



# Conception et développement de dispositifs et matériaux innovants pour la microélectronique et l'optique

Aurelian Crunteanu

## ► To cite this version:

Aurelian Crunteanu. Conception et développement de dispositifs et matériaux innovants pour la microélectronique et l'optique. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université de Limoges, 2014. tel-01054499

**HAL Id: tel-01054499**

**<https://theses.hal.science/tel-01054499>**

Submitted on 7 Aug 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Travaux scientifiques de synthèse  
présentés à l'Université de Limoges pour obtenir le diplôme  
**d'Habilitation à Diriger des Recherches**  
par

**Aurelian Crunteanu-Stanescu**

le 4 avril 2014

***Conception et développement de dispositifs et matériaux  
innovants pour la microélectronique et l'optique***

**JURY**

**Président :**

**Gilles Dambrine** – Professeur à l'Université de Lille (IEMN)

**Rapporteurs :**

**Aline Rougier** – Directeur de recherche -CNRS, (ICMC Bordeaux)

**Maryline Guilloux-Viry** – Professeur à l'Université de Rennes1 (ISCR)

**Bernard Flechet** – Professeur à l'Université de Savoie (IMEP-LAHC)

**Examineurs :**

**Valérie Mdrangeas** – Professeur à l'Université de Limoges (XLIM)

**Corinne Champeaux** – Professeur à l'Université de Limoges (SPCTS)

**Dominique Cros** – Professeur à l'Université de Limoges (XLIM)

**Alain Barthelemy** – Directeur de recherche CNRS (XLIM)

**Jean-Pierre Raskin** – Professeur à l'Université catholique de Louvain (UCL)

**Olivier Vendier** – Ingénieur Thales Alenia Space, Toulouse

**Pierre Blondy** – Professeur à l'Université de Limoges (XLIM)

## REMERCIEMENTS

Les travaux de recherche synthétisés dans ce mémoire ont été réalisés principalement au laboratoire XLIM (UMR 7252 CNRS/ Université de Limoges).

J'adresse ici mes plus vifs remerciements à Valérie Madrangeas, responsable du département Minacom, à Dominique Cros (ex-directeur du laboratoire XLIM) et à Pierre Blondy (responsable du projet MINT- Minacom) pour avoir suivi et encadré, chacun à sa manière, ce travail. Je leur suis particulièrement reconnaissant pour leur écoute et dynamisme quotidien, la confiance qu'ils ont accordée à mes recherches depuis mon arrivée au laboratoire mais aussi pour leur sympathie et leur amitié.

J'exprime ma reconnaissance et mes remerciements à l'ensemble des membres du jury. Je suis très honoré qu'ils aient accepté de juger les travaux présentés dans ce mémoire.

J'adresse mes remerciements à tous les membres du département Minacom, qui ont contribué à la progression de mon parcours de chercheur de par leurs compétences et leurs qualités humaines. Sans pouvoir tous les mentionner ici, je pense en particulier à mes collègues Matthieu Chatras, Arnaud Pothier, Annie Bessaudou et Cyril Guines. Je les remercie pour leur aide, leur engagement et leur enthousiasme permanent.

Je tiens à remercier Marie-Laure Guillat pour son aide administrative, sa disponibilité, son efficacité organisationnelle et son sens de l'humour et du franc-parler.

Les activités de recherches visant l'intégration de matériaux innovants ont été développées en partie avec l'aide et les compétences du laboratoire SPCTS. Je tiens à remercier particulièrement Corinne Champeaux, Jean-Christophe Orlianges et Alain Catherinot pour leur disponibilité, leur ouverture d'esprit et leur soutien indéfectible depuis mes débuts en tant que chercheur CNRS.

Je tiens à remercier l'aide précieuse de mes collègues du département Photonique du laboratoire XLIM. Je pense en particulier à Alain Barthelemy, Vincent Couderc et Vincent Kermene qui ont contribué de manière décisive aux travaux d'intégration de composants MEMS optiques dans les systèmes laser à fibre.

Je remercie vivement les étudiants avec lesquels j'ai travaillé et qui ont permis de faire avancer ces travaux. Leur rôle particulier sera détaillé dans le manuscrit.

Plus largement, j'associe à ces remerciements, l'ensemble des personnes du laboratoire avec lesquelles j'ai travaillé et je continue à travailler pour mener à bien ces travaux de recherche.

Ces activités n'auraient pu avoir lieu sans le soutien des organismes publics ou partenaires industriels, auxquels j'exprime mes profonds remerciements.

Ce mémoire présente de manière non-exhaustive la synthèse de mes travaux de recherche et de mon activité des encadrements de doctorants auxquels j'ai participé au laboratoire XLIM (UMR7252 CNRS/ Université de Limoges) depuis mon recrutement en tant que chargé de recherches CNRS en 2003.

Il est articulé en deux parties distinctes. La première est une présentation synthétique de mes activités, en termes de recherche, de production scientifique et d'encadrement doctoral.

Les résultats de recherche les plus significatifs sont présentés en seconde partie. A caractère fortement multidisciplinaire, ils sont orientés vers la réalisation de dispositifs et systèmes originaux (intégration des matériaux innovants ou développement des dispositifs MEMS optiques) dédiés à la microélectronique (basses et hautes fréquences) et au domaine de l'optique.

Tout d'abord, nous présentons le développement des composants MOEMS (ou MEMS optiques) et leur intégration (comme modulateurs actifs et, en même temps, miroirs de fond de cavité) dans des systèmes lasers à fibre. Nous montrons que l'association de ces modulateurs compacts et rapides au déclenchement de cavités lasers courtes, permet d'obtenir des impulsions laser très courtes, en régime nanoseconde. Ces microcomposants offrent un fort potentiel de miniaturisation et de réduction du coût des sources lasers impulsionsnelles à fibre optique et montrent également leur capacité à atteindre des fréquences de fonctionnement supérieures au mégahertz, compatible au régime à verrouillage de modes d'une cavité laser. Leur robustesse et leur faible niveau d'activation (10 V-50 V) en font de bons candidats pour remplacer les solutions de modulations actuels (électro- ou acousto-optiques).

Par la suite, nos recherches se sont étendues à l'association des sources lasers avec les propriétés remarquables des dispositifs MOEMS (compacité, faibles pertes d'insertion, achromaticité etc.) pour créer des systèmes lasers impulsionsnels complexes : lasers fibrés avec des impulsions nanosecondes de forte puissance crête avec fréquences de récurrence ajustable, systèmes lasers bi-longueur d'onde, système de sélectivité spectrale en utilisant une source de continuum et une matrice de micro- miroirs, multiplexage temporel et spectral de sources lasers à MOEMS pour un fonctionnement à haute cadence etc. Les résultats obtenus permettent d'envisager des développements innovants dans des domaines comme la bio- photonique (diagnostic ou tri cellulaire, tomographie optique cohérente), télécommunications, microscopie confocale, radar optique, etc.

La suite du travail présenté dans ce mémoire concerne la conception et la fabrication de dispositifs reconfigurables pour la microélectronique basses et hautes fréquences (du DC aux fréquences THz) basés sur la transition réversible semi-conducteur- métal (Metal- Insulator Transition – MIT ou transition de Mott) d'un matériau « intelligent » : le dioxyde de vanadium, VO<sub>2</sub>. Actuellement, les matériaux intelligents font l'objet de beaucoup d'attention de la part de la communauté scientifique à cause de leurs caractères évolutifs et adaptatifs qui font d'eux des candidats potentiels pour de nombreuses applications (transmission de l'information, optoélectronique, matériaux artificiels). Nous avons utilisé les propriétés exceptionnelles du matériau VO<sub>2</sub> en couches minces pour concevoir et développer de **nouveaux concepts de commutateurs et de dispositifs rapides fonctionnant dans les domaines DC, RF -micro-ondes, Téraherz et optique.**

Nous montrons que dans les couches minces de VO<sub>2</sub> obtenus par ablation laser (PLD) ou par évaporation à faisceaux d'électrons, cette transition MIT est accompagnée par un changement rapide et remarquable des propriétés électriques et optiques du matériau (e.g. changement de quatre à cinq ordres de grandeur de résistivité entre les deux états). La transition MIT dans le matériau VO<sub>2</sub> peut être initiée de différentes manières : thermiquement, électriquement ou optiquement.



Dans un premier temps, nous exploitons l'important changement des propriétés électriques/diélectriques de ce matériau soumis à un actionnement thermique et électrique pour réaliser des commutateurs micro-ondes en technologie coplanaire, et ensuite des dispositifs plus complexes comme des limiteurs de puissance large bande, des filtres micro-ondes à rejection de bande et à fréquences accordables ou encore des composants hybrides type métamatériaux accordables dans le domaine THz. Les composants intégrant le matériau VO<sub>2</sub> présentent des propriétés intéressantes, notamment sur le plan des caractéristiques électriques où ils montrent un comportement très large bande et de fortes isolations. Ils peuvent se positionner comme des solutions alternatives intéressantes aux technologies classiques (semi-conducteurs et dispositifs électromécaniques) utilisées dans la fabrication de composants millimétriques et submillimétriques.

A un niveau plus fondamental (mais avec des applications potentiels très intéressantes), nous avons caractérisé les propriétés électriques fortement non-linéaires des couches minces de VO<sub>2</sub> (apparition du phénomène de résistance négative différentielle (NDR) dans leurs caractéristiques courant-tension) et nous avons mis en évidence, la génération d'auto-oscillations électriques dans des dispositifs à base de films de VO<sub>2</sub>. Ces résultats nous permettent d'envisager dans un futur proche plusieurs directions de recherche innovantes basées sur l'utilisation des matériaux présentant des transitions MIT ou des transitions de phase, sous la forme de couches minces ou de nanostructures (nano-agrégats, nano-fils etc.).

La dernière partie du mémoire est dédiée aux perspectives de recherche à moyen et long terme en systématisant les directions de recherches que nous poursuivrons dans les prochaines années autour de l'étude et l'intégration de matériaux à propriétés accordables (couches minces ou nanostructures) dans des dispositifs innovants pour des applications comme le traitement de l'information, l'énergie ou la détection de grandeurs physiques variées.

Enfin, l'ensemble de mes publications scientifiques est joint dans l'Annexe du manuscrit.

Bonne lecture !

# Table de matières

## Conception et développement de dispositifs et matériaux innovantes pour la microélectronique et l'optique

### Remerciements

### Avant-propos

<b>Partie 1.</b>	1
<b>Présentation des activités de recherche et d'encadrement doctoral</b>	2
<b>Curriculum Vitae</b> .....	2
<b>Synthese des activités de recherche</b> .....	7
Recherches à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse (2000- 2003) .....	7
Travaux de recherche de 2003 à présent, au laboratoire XLIM, CNRS/ Université de Limoges ....	8
<b>Activités d'encadrement, d'animation et d'administration de la recherche</b> .....	10
Encadrement de masters/ stagiaires, de doctorants et de post-doctorats.....	10
Responsabilités dans l'animation de programmes et/ou de projets.....	11
Actions de diffusion de la culture scientifique et autres responsabilités .....	12

### Partie 2

<b>Synthèse de travaux de recherche récents et perspectives de recherche</b>	14
<b>Chapitre 1.</b>	
<b>Développement de micro miroirs déformables (MEMS optiques) et leur intégration dans des systèmes optiques complexes</b>	15
<b>1.1 Microsystèmes MEMS pour la commutation optique (MOEMS) et leurs association avec des cavités lasers</b> .....	15
<b>1.2. Génération d'impulsions nanosecondes en régime Q-switch en utilisant de micro miroirs déformables</b> .....	18
1.2.1 Developement de micro-miroirs actionnés électrostatiquement .....	20
Composants de type « pont » .....	21

Composants de type « cantilever » .....	23
1.2.2 Source laser à fibre déclenchée par des MOEMS de type pont .....	24
1.2.3 Déclenchement actif d'une cavité laser par intégration des composants MOEMS de type cantilever .....	32
<b>1.3 Systèmes laser à fibre multilongueur d'onde à déclenchement électromécanique .....</b>	<b>45</b>
1.3.1 Laser impulsionnel a fibres bi-longueur d'onde .....	45
1.3.2 Sommaton de fréquence dans un cristal PPLN .....	48
1.3.3. Système laser multicolore à codage multiple pour le diagnostic cellulaire .....	53
<b>1.4. Laser fibré à MOEMS fonctionnant en régime de synchronisation des modes longitudinaux .....</b>	<b>62</b>
<b>1.5. Multiplexage temporel et spectral de sources lasers à MOEMS pour un fonctionnement à haute cadence .....</b>	<b>68</b>
<b>Conclusions.....</b>	<b>80</b>
<b>Références.....</b>	<b>82</b>

## Chapitre 2.

### Dispositifs innovants pour la microélectronique et l'optique intégrant des matériaux à transition de phase isolant-métal ( $\text{VO}_2$ ) 84

#### 2.1 La transition de phase isolant-métal (MIT) du dioxyde de vanadium ( $\text{VO}_2$ ) : une direction prometteuse vers des dispositifs et systèmes accordables basses et hautes fréquences .... 86

Couches minces de  $\text{VO}_2$  obtenus par ablation laser reactiv .....

87

Dépôts par évaporation thermique à faisceau d'électrons.....

88

Caractéristiques electriques et optiques de couches minces de  $\text{VO}_2$ .....

89

#### 2.2. Réalisation de commutateurs électriques basés sur la transition isolant- métal du $\text{VO}_2$ . 96

2.2.1 Commutateurs à deux terminaux à base de  $\text{VO}_2$  : caracteristiques courant-tension .....

96

2.2.2 Propriétés electriques non-linéaires des dispositifs 2T à base de  $\text{VO}_2$  : phénomène d'auto-oscillations .....

99

2.2.3. Commutateurs optiques basés sur la commutation electrique des dispositifs à dioxyde de vanadium .....

108

#### 2.3 Intégration de films de $\text{VO}_2$ dans des guides coplanaires micro-ondes (CPW)..... 110

2.3.1 Conception et realisation des commutateurs dans le domaine micro-onde : actionnement thermique et electrique.....

110

2.3.2. Etude de la fiabilité des commutateurs à base de  $\text{VO}_2$ .....

117

<b>2.4. Réalisation de filtres à rejection de bande et à fréquences accordables basés sur la transition MIT du VO<sub>2</sub>.....</b>	<b>127</b>
2.4.1 Filtres hyperfréquences intégrant des résonateurs en forme de C.....	127
2.4.2. Filtres hyperfréquences en technologie SRR (Split- Ring Resonators).....	130
<b>2.5. Limiteurs de puissance large bande basés sur la transition isolant-métal du VO<sub>2</sub>.....</b>	<b>149</b>
<b>2.6. Métamatériaux accordables électriquement dans le domaine TéraHertz .....</b>	<b>164</b>
<b>Conclusions.....</b>	<b>169</b>
<b>Références.....</b>	<b>170</b>

### Chapitre 3.

<b>Conclusions et Perspectives</b>	<b>174</b>
<b>Objectifs de recherche à moyen et long terme.....</b>	<b>175</b>
<b>Elaboration et caractérisation de nano-fils semi-conducteurs et métalliques pour des dispositifs hybrides à récupération d'énergie .....</b>	<b>176</b>
<b>Effets non linéaires (électriques, optiques) dans les matériaux à transition de phase.....</b>	<b>178</b>
<b>Dispositifs neuro-morphiques intégrant des matériaux non-linéaires pour les nouveaux paradigmes de communications .....</b>	<b>180</b>
<b>Dispositifs innovants accordables pour l'optique et l'optique intégrée à base de matériaux intelligents .....</b>	<b>181</b>
<b>Génération d'impulsions ultracourtes dans une cavité laser en utilisant des éléments MOEMS. Techniques hybrides avec des absorbants saturables. ....</b>	<b>183</b>
 <b>Annexe : Liste complète des publications. ....</b>	 <b>185</b>

# **PARTIE 1.**

## **PRESENTATION DES ACTIVITES DE RECHERCHE ET D'ENCADREMENT DOCTORAL**

## PARTIE 1.

### PRESENTATION DES ACTIVITES DE RECHERCHE ET D'ENCADREMENT DOCTORAL

#### CURRICULUM VITAE

**Nom:** CRUNTEANU STANESCU

**Prénom:** Aurelian

**Dates personnelles:** Né le 01.04.1972 à Slobozia (Roumanie), marié, 2 enfants

**Adresse professionnelle:**

Institut de recherche XLIM, UMR 7252 CNRS/ Université de Limoges

Département MINACOM

123 avenue Albert Thomas, 87060 LIMOGES Cedex FRANCE

Tel: +33 (0) 5 87 50 67 41, Fax: +33 (0) 5 55 45 76 49

[aurelian.crunteanu@xlim.fr](mailto:aurelian.crunteanu@xlim.fr), [www.xlim.fr](http://www.xlim.fr)

**Corps-grade:** charge de recherche, CR1, Section 8 : Micro et nano - technologies, électronique, photonique, électromagnétisme, énergie électrique

**Institut CNRS:** Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes (INSIS)

**Délégation du CNRS:** 8 Centre Limousin Poitou-Charentes

#### Parcours professionnel:

2003- à présent	<b>Chargé de recherche CNRS</b> <b>Institut de recherche XLIM</b> , UMR 7252 CNRS/ Université de Limoges <i>(fondé en 2006, incluant l'ancien Institut de Recherches en Communications Optiques et Micro-ondes, IRCOM-UMR CNRS 6615)</i>
2001 - 2003	<b>Post-doctorant (assistant de recherche)</b> <b>Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)</b> , Institute for Biomedical Imaging, Optics and Engineering (BIO-E), Laboratoire de Photonique Appliquée
1998 - 2001	<b>Doctorat en cotutelle Science et Génie des Matériaux</b> <i>Université Claude Bernard-Lyon 1, Laboratoire des Sciences et Ingénierie des Surfaces, Faculté de Physique, Université de Bucarest (Roumanie)</i>
1997- 2000	<b>Doctorat en Physique</b> <i>Faculté de Physique, Université de Bucarest, Roumanie</i>
1995 - 2000	<b>Chargé de recherche, préparation thèse de doctorat</b> <i>Laboratoire de Photochimie avec des Lasers, Institut National pour la Physique des Lasers, Plasma et Radiation (INPLPR), Bucarest</i>

1995 - 1996	<b>Master - Optique et Technologies avec Plasma et Lasers</b> <i>Faculté de Physique, Université de Bucarest</i>
1990 - 1995	<b>Licence + Maitrise (5 ans) Optique et Opto-techniques</b> <i>Faculté de Physique, Université de Bucarest</i>

### Expérience professionnelle et intérêts scientifiques:

- **Conception et développement de matériaux innovants pour la microélectronique et l'optique et leurs intégrations dans des composants et systèmes RF, micro-ondes et optiques (diélectriques, carbo- nitrures, composites etc.)**
  - Dépôts réalisés par laser (techniques CVD assistée laser – LCVD, ablation laser)
  - Dépôts réalisés par pulvérisation magnétron, CVD assistée plasma – PECVD
  - Etudes sur l'interaction laser- matière (cristallisation, modification d'indice de réfraction)
  - Elaboration en phase gazeuse de poudres nanométriques (carbone, nitrure de carbone, oxydes et carbures de fer).
- **Conception, réalisation, développement et études de fiabilités des composants micro-électro- mécaniques type MEMS (Micro- Electro- Mechanical Systems) à vocation télécommunications radiofréquences et hyperfréquences**
- **Réalisation des composants innovants pour l'optique et l'optique intégrée**
  - Déclenchement actif des lasers à fibres pulsés (technique Q-switch) en utilisant des composants type MEMS optiques.
  - Réalisation de nouvelles sources optiques à bande large ou des lasers à guides d'onde de type canal en saphir dopé titane pour des applications biomédicales.
  - Caractérisation optique des guides planaires et canaux (propagation, pertes, guidage, profil et qualité des faisceaux guidés, m-lines spectrometry).
- **Développement de nouveaux procédés pour les techniques de micro fabrication**
  - Salle blanche (photolithographie, micro structuration laser, gravure humide et sèche – RIE, etc.).
  - Fabrication et caractérisation de micro- et nano- structures dans des cristaux lasers (micro- structuration 3D et 2D de verres et cristaux optiques).
- **Micro- et nano-composants intégrant des matériaux intelligents pour la micro- et nanoélectronique et l'optique (couches minces et nanostructures/ nano-fils de matériaux à transition de phase, ferroélectriques, etc.)**
  - Résistances à mémoire (memristors, neuristors)
  - Micro- et nano-oscillateurs pour le calcul bio-inspiré (neuromorphique).
  - Capteurs faible consommation de température, de pression et de gaz.
  - Nano- générateurs hybrides pour la récupération d'énergie.
  - Métamatériaux hybrides accordables pour le THz et l'optique.

### Responsabilités et appartenance à des sociétés scientifiques:

- Reviewer pour des revues internationales (journaux IOP, AIP, IEEE and PIER) Journal of Electromagnetic Waves and Applications (JEMWA), Progress in Electromagnetic Research (PIER),

IEEE Electron Device Letters, Smart Materials and Structures, Journal of Physics D: Applied Physics, Optics Communications, Journal of Micromechanics and Microengineering etc.

- Membre de la société scientifique Materials Research Society (MRS) USA
- Membre IEEE (EDS- Electron Devices Society).

**Distinctions:** Diplôme d'excellence dans la recherche (reçue conjointement en 2000 avec I. Morjan, I. Gutu et I. Voicu) accordé par l'Agence Nationale pour la Science, Technologie et Innovation de Roumanie pour les travaux de recherche concernant les «Poudres nanométriques obtenues par pyrolyse laser»

#### Axes principaux de recherche:

- Intégration de matériaux innovants avec de nouvelles fonctionnalités (diélectriques, matériaux à transition de phase etc. sur la forme de couches minces, nano- structures ou nano- composites) dans des dispositifs et systèmes avancés pour des applications dans la nanoélectronique et l'électronique haute fréquence et l'optique/ l'optoélectronique (commutateurs, filtres accordables, guides d'ondes etc.).
- Conception et réalisation de micro- systèmes à base de M(N)EMS (Micro-Nano Electro-Mechanical Systems) pour des applications dans le domaine des télécommunications- RF/ hyperfréquences (MEMS- RF et optiques (MOEMS) (micro fabrication en salle blanche, synthèse et caractérisation des composants dans les domaines RF – micro-ondes et optique).

Les travaux que je développe, impliquent une approche multidisciplinaire, allant de la fabrication des matériaux et du développement des micro- et nano- technologies jusqu'à la réalisation et la caractérisation des composants innovants pour la microélectronique et l'optique.

#### Résultats marquants (2009- 2012):

- **Réalisation des fonctions de commutation avancées (commutateurs, filtres, limiteurs de puissance RF) dans les domaines micro-ondes et optique à base de couches minces de dioxyde de vanadium ( $VO_2$ ) présentant une transition réversible de Mott** (en collaboration avec le laboratoire SPCTS et le département Photonique de l'XLIM).
- **Démonstration de premiers limiteurs de puissance micro-ondes à base de  $VO_2$** , pour la protection des têtes de réception de systèmes de communication RF et micro-ondes comme alternative compacte aux solutions existantes. Ces dispositifs très simples peuvent facilement être intégrés dans de nombreux dispositifs microondes.
- **A un niveau plus fondamental** (mais avec des applications potentielles majeures), mise en évidence, pour la première fois, de **la génération d'auto-oscillations électriques** dans des dispositifs à **base de films et de nano-fils de matériaux à transition de phase ( $VO_2$ )**
- **Intégration de modulateurs électromécaniques type MOEMS avec une source à large bande spectrale pour la sélection spectrale et le codage des signaux sélectionnés pour des applications biomédicales** (objet d'un brevet France 0707098 du 10/10/2007, d'un brevet pays PCT WO2009/087287 du 16.07.2009).
- **Réalisation de systèmes lasers à fibres à base de micro- miroirs type MOEMS, générant des impulsions ultracourtes et avec une fréquence de récurrence ajustable** (en collaboration avec le département Photonique de l'XLIM) ; fait marquant 2010 de l'Institut INSIS-CNRS.

#### Publications:

Plus de 100 publications dans des revues et actes de congrès avec comité de lecture et plus de 100 communications à des conférences nationales et internationales, 4 brevets.

**h index= 17 (Scopus et ISI Web of Science).**



**Pour la période 2009-2012: 17 publications** dans des revues internationales à comité de lecture, **7 conférences invitées, 65 contributions à des conférences** internationaux (38) et nationaux (27) avec actes et comité de lecture, **1 chapitre d'ouvrage, 1 brevet.**

Pour une liste complète des publications, voir **Annexe** ou consulter :

[https://www.researchgate.net/profile/Aurelian\\_Crunteanu/](https://www.researchgate.net/profile/Aurelian_Crunteanu/)

<http://scholar.google.fr/citations?user=Fav7ug0AAAAJ&hl=fr>

### **Sélection de publications scientifiques depuis 4 ans (2009-2012):**

1. J.-C. Orlanges, **A. Crunteanu**, A. Pothier, T. Merle-Mejean, P. Blondy, C. Champeaux, "Titanium dioxide thin films deposited by pulsed laser deposition and integration in radio frequency devices: study of structure, optical and dielectric properties", *Appl. Surf. Sci.*, **263**, pp. 111-114 (2012)
2. M. Fabert, A. Desfarges-Berthelemot, V. Kermène, and **A. Crunteanu**, "Temporal synchronization and spectral combining of pulses from fiber lasers Q-switched by independent MEMS micro-mirrors", *Optics Express*, Vol. 20, Issue 20, pp. 22895-22901 (2012), <http://dx.doi.org/10.1364/OE.20.022895>
3. J.-C. Orlanges, J. Leroy, **A. Crunteanu**, R. Mayet, P. Carles, and C. Champeaux, "Electrical and optical properties of vanadium dioxide containing gold nanoparticles deposited by pulsed laser deposition", *Appl. Phys. Lett.* **101**, 133102 (2012);
4. D. Bouyge, **A. Crunteanu**, M. Duran-Sindreu, A. Pothier, P. Blondy, J. Bonache, J.-C. Orlanges and F. Martin, "Reconfigurable split rings based on MEMS switches and their application to tunable filters", *Journal of Optics*, Special issue: Reconfigurable and Switchable Metamaterials, **14**, 114001 (2012) (9pp), [doi:10.1088/2040-8978/14/11/114001](https://doi.org/10.1088/2040-8978/14/11/114001), invited paper.
5. J. Leroy, **A. Crunteanu**, A. Bessaudou, F. Cosset, C. Champeaux, J.-C. Orlanges, "High-speed metal-insulator transition in vanadium dioxide films induced by an electrical pulsed voltage over nano-gap electrodes", *Appl. Phys. Lett.* **100**, 213507 (2012)
6. V. Couderc, **A. Crunteanu**, M. Fabert, F. Doutre, F. El Bassri, D. Pagnoux, and A. Jalocha, "Picosecond pulse generation in a hybrid Q-switched laser source by using a microelectromechanical mirror", *Optics Express* **20**(5) pp. 5524-5529, 2012.
7. J. Leroy, A. Bessaudou, F. Cosset, **A. Crunteanu**, "Structural, electrical and optical properties of thermochromic VO<sub>2</sub> thin films obtained by reactive electron beam evaporation", *Thin Solid Films* **520**, pp. 4823-4825, (2012)
8. J. Leroy, **A. Crunteanu**, J. Givernaud, J.-C. Orlanges, C. Champeaux, P. Blondy, "Generation of electrical self-oscillations in two-terminal switching devices based on the insulator-to-metal phase transition of VO<sub>2</sub> thin films", *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, **4**(01), pp. 101-107, 2012
9. M. Fabert, V. Kermene, A. Desfarges-Berthelemot, P. Blondy, **A. Crunteanu**, "Actively mode-locked fiber laser using a deformable micromirror", *Optics Letters* **36**, 2191, 2011
10. D. Bouyge, D. Mardivirin, J. Bonache, **A. Crunteanu**, A. Pothier, M. Durán-Sindreu, P. Blondy, F. Martín, "Split Ring Resonators (SRRs) based on Micro-Electro-Mechanical Deflectable Cantilever-Type Rings: Application to Tunable Stopband Filters", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, **21**(5), pp. 243 – 245, may 2011
11. **A. Crunteanu**, J. Givernaud, J. Leroy, D. Mardivirin, C. Champeaux, J.-C. Orlanges, A. Catherinot and P. Blondy, "Voltage- and current-activated metal-insulator transition in VO<sub>2</sub>-based electrical switches: a lifetime operation analysis", *Sci. Technol. Adv. Mater.* **11** (2010) 065002 (6pp).
12. J. Givernaud, **A. Crunteanu**, J.-C. Orlanges, A. Pothier, C. Champeaux, A. Catherinot, P. Blondy, "Microwave power limiting devices based on the semiconductor metal transition in Vanadium dioxide thin films", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **58** (9), art. no. 5545454, pp. 2352-2361, (2010)
13. A. Verger, A. Potheir, C. Guines, **A. Crunteanu**, P. Blondy, J.-C. Orlanges, J. Dhennin, A. Broue, F. Courtade and O. Vendier, "Sub-hundred nanosecond electrostatic actuated RF MEMS Switched capacitors", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **20** (2010) 064011 (7pp)
14. M. Bousquet, J.-R. Duclère, C. Champeaux, A. Boule, P. Marchet, A. Catherinot, A. Wu, P. M. Vilarinho, S. Députier, M. Guilloux-Viry, **A. Crunteanu**, B. Gautier, D. Albertini, and C. Bachelet, "Macroscopic and nanoscale electrical properties of pulsed laser deposited (100) epitaxial lead-free Na<sub>0.5</sub>Bi<sub>0.5</sub>TiO<sub>3</sub> thin films", *Journal of Applied Physics* **107** (2010) 034102
15. S. Courrèges, C. Thibon, F. Houndonougbo, **A. Crunteanu**, H. Jallageas, V. Madrangeas, M. Maignan, C. Laporte, C. Zanchi, "Tuning of Superconducting Filters with Laser Ablation Technique", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **19** (5), art. no. 5136200, pp. 3715-3721 (2009)

16. D. Mardivirin, A. Pothier, **A. Crunteanu**, B. Vialle and P. Blondy, Charging in Dielectric Less Capacitive RF-MEMS Switches, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 57 (1), 231-236 (2009)
17. F. Dumas-Bouchiat, C. Champeaux , A. Catherinot , J. Givernaud , **A. Crunteanu** , P. Blondy "RF Microwave Switches Based on Reversible Metal-Semiconductor Transition Properties of VO<sub>2</sub> Thin Films: An Attractive Way to Realise Simple RF Microelectronic Devices" in MATERIALS AND DEVICES FOR SMART SYSTEMS III Book Series: Materials Research Society Symposium Proceedings, Volume: 1129 pp. 275-286 (2009)
18. A. **Crunteanu**, J. Givernaud, P. Blondy, J.-C. Orlanges, C. Champeaux and A. Catherinot, "Exploiting the semiconductor-metal phase transition of VO<sub>2</sub> materials: a novel direction towards tuneable devices and systems for RF-microwave applications", in *Advanced Microwave and Millimeter Wave Technologies Semiconductor Devices Circuits and Systems*, Moumita Mukherjee (Ed.), ISBN: 978-953-307-031-5, INTECH, 2010
19. D. Bouyge, C. Lesvigne, V. Couderc, **A. Crunteanu**, P. Leproux, L. Lefort, "Procédé et dispositif de caractérisation d'éléments microscopiques" Brevet France 0707098 du 10/10/2007, demande PCT/FR2008/001424, le 10/10/2008. Extension aux pays PCT: « Method and device for characterizing microscopic elements », WO2009/087287 du 16.07.2009, Demande d'extension au Japon le 09/04/2010, Brevet USA USPTO 01/04/2011, N/Réf. 101378/PCT : Demande de brevet américain n°12/682, 268 issue de la demande PCT/RF2008/001424 du 10/10/2008

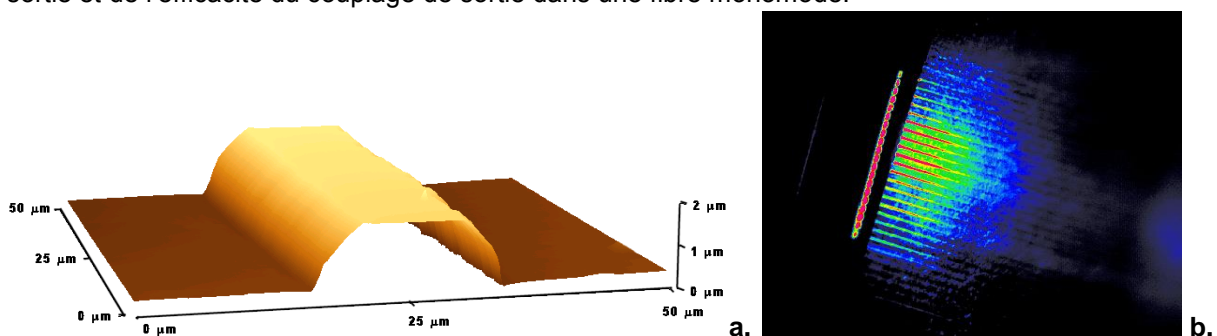
### Objectifs et thèmes de recherche à moyen et long terme :

- **Composants émergents à l'échelle nanométrique** (memristors, transistors Mott-FET, mémoires résistives...) à base de matériaux innovants (multi-composites accordables, 2D, nano-fils organiques/inorganiques) pour les nouveaux paradigmes du calcul neuro-morphique (logiques parallèles ou bio-inspirées).
- **Métamatériaux hybrides 2D et 3D accordables** dans le domaine THz (et de l'optique) à base de matériaux à transition de phase et dispositifs MEMS.
- **Dispositifs innovants accordables pour l'optique** et l'optique intégrée à base de matériaux intelligents (verres non-linéaires et matériaux à transition de phase).
- **Génération d'impulsions ultracourtes dans des cavités laser** en utilisant des éléments MOEMS et techniques hybrides avec des absorbants saturables. Micro lasers et guides optiques non linéaires micro- et nano- structurés à base de verres dopés

## RECHERCHES A L'ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE, SUISSE (2000- 2003)

Les travaux de mes recherches postdoctorales dans le *Laboratoire de Photonique Appliquée* (*Institute for Biomedical Imaging, Optics and Engineering BIO-E*) de L'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) concernent la **réalisation de sources optiques à bande large ou des lasers à guides d'onde de type canal en saphir dopé titane**. L'intérêt d'un guide d'onde de ce type par rapport au matériau massif pour les applications laser réside dans la structure de type canal qui favorise la compacité du système, diminue le seuil de l'émission laser et augmente le rendement et la puissance de sortie du laser. Pour les applications biomédicales visées, notre approche utilisait une source lumineuse à bande large basée sur une structure multiple de guides d'onde canaux en Ti:saphir. Comparée aux lasers femto seconde actuellement utilisés en OCT (Optical Coherence Tomography), cette solution permettait de concevoir un dispositif simple, compact et efficace, permettant le balayage parallèle (donc, rapide), in vivo, des structures biologiques [1,2]<sup>1</sup>.

Nous nous sommes focalisés, d'une part, à **fabriquer** des structures de type guide d'onde canal, et d'autre part, à **étudier la fluorescence** émise par des guides d'onde planaires et de type canal en saphir dopé titane. Lors de la fabrication des structures nano- et micrométriques dans le saphir et saphir dopé titane, nous avons employé diverses méthodes de structuration, notamment **l'ablation laser directe / l'écriture laser**, le dépôt d'un **film de polyimide et la structuration par ablation laser (strip loading)**, **l'implantation ionique avec des ions He<sup>+</sup> suivie de gravure humide** et la **gravure réactive plasma sélective** (RIE- Reactive Ion Etching) à travers un masque en résine photosensible. Les structures ont été caractérisées par profilométrie, microscopie optique, microscopie électronique à balayage et par microscopie à force atomique. L'essentiel du travail de structuration s'est déroulé en salle blanche au sein du Centre de Microtechnologie (CMI) de l'EPFL. La caractérisation optique de telles structures concerne l'étude du couplage avec le laser de pompage (Ar<sup>+</sup>), l'évaluation des pertes dans le guide, du profil du faisceau, de la divergence du faisceau de sortie et de l'efficacité du couplage de sortie dans une fibre monomode.



**Figure 1.** a. Image par AFM d'un guide canal Ti:saphir obtenu par gravure plasma (RIE) et b. Utilisation d'une matrice de vingt microlentilles pour le pompage optique simultané de guides canaux parallèles pour la caractérisation de la propagation optique (effet laser, pertes etc.).

La méthode de gravure réactive plasma - RIE a fourni les meilleurs résultats au niveau des propriétés optiques du guide canal (guidage et émission de la fluorescence Ti:saphir maximisés). En utilisant cette méthode nous avons obtenu pour la première fois un guide canal en Ti:saphir avec une émission de fluorescence très confinée, qui couplé avec une fibre monomode conduit à une efficacité

<sup>1</sup> [1] M. Pollnau, R.P. Salathé, T. Bhutta, D.P. Shepherd, R.W. Eason: Opt. Lett. **26**, 283 (2001).

[2] A. Kowalevich, T. Ko, I. Hartl, J.G. Fujimoto, M. Pollnau, R.P. Salathé: Opt. Express **10**, 349 (2002).

d'un ordre de grandeur plus élevé que celle du guide planaire (Figure 1) [3,4]<sup>2</sup>.

En même temps, en utilisant la méthode d'implantation ionique du saphir avec des ions  $\text{He}^+$  suivie de gravure humide, nous avons développé une méthode innovante pour la structuration tridimensionnelle du saphir (Figure 2). Cette possibilité présente un avantage significatif par rapport à d'autres méthodes. En effet, il est alors possible d'inclure l'isolation des couches minces de saphir dans la technologie silicium-sur-saphir (SOS) pour obtenir des canaux micro-fluidiques complexes pour des applications à hautes températures [5]<sup>3</sup>.

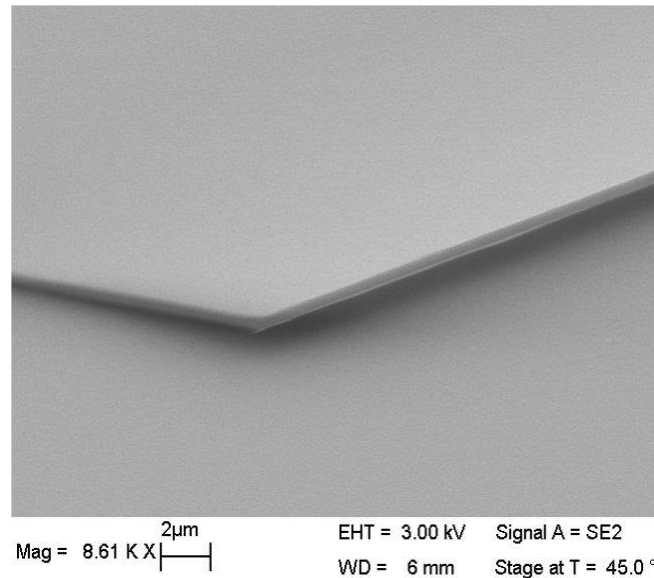


Figure 2. Image par microscopie électronique à balayage (MEB) d'une structure 3D en saphir (implantation ionique + gravure humide)

## TRAVAUX DE RECHERCHE DE 2003 A PRESENT, AU LABORATOIRE XLIM, CNRS/ UNIVERSITE DE LIMOGES

Les activités de recherche se déroulent au sein du département "**Micro et Nanotechnologies pour les composants optiques et micro-ondes**" (MINACOM) (Responsable du département- Prof. Valérie Madrangeas). Le département MINACOM est organisé en trois projets (<http://www.xlim.fr/fr/MINACOM>) étroitement liées à travers des interactions et des collaborations communes:

- Le projet **Micro et Nano structures pour les Télécoms (MINT)** développe de nouvelles technologies permettant la micro fabrication de composants comme les MEMS et l'intégration de matériaux innovants pour des applications dans le domaine des micro-ondes, de l'optique et de la biologie.

- Le projet **Optoélectronique Plastique** traite tous les aspects liés à la mise au point de composants plastiques (diodes électroluminescentes, transistors à effet de champ, cellules solaires) qui englobent les modélisations physiques, les réalisations et les caractérisations spécifiques.

<sup>2</sup> [3] A. Crunteanu, M. Pollnau, G. Jänchen, C. Hibert, P. Hoffmann, R.P. Salathé, R.W. Eason, C. Grivas, and D.P. Shepherd, Appl. Phys. B 75 (1), 15-17 (2002).

[4] A. Crunteanu, P. Hoffmann, M. Pollnau, and Ch. Buchal, "A comparative study on methods to structure sapphire", Appl. Surf. Sci., 208-209 (1), pp. 322-326 (2003).

<sup>3</sup> [5] A. Crunteanu, G. Jänchen, P. Hoffmann, M. Pollnau, Ch. Buchal, A. Petraru, R.W. Eason, and D.P. Shepherd, "Three-dimensional structuring of sapphire by sequential  $\text{He}^+$  ion-beam implantation and wet chemical etching", Applied Physics A: Materials Science and Processing, 76 (7), 1109-1112 (2003).

- Le projet **Méthodes Avancées de Conception par l'Analyse et l'Optimisation** (MACAO) développe un ensemble de techniques (méthodologies et outils associés) pour la conception optimisée de composants et circuits hyperfréquences.

Je développe mes activités essentiellement dans le cadre du premier projet, **Micro et nano structures pour les télécoms (MINT)**, Responsable Prof. Pierre Blondy) et également autour du centre de micro- et nano- technologies de la plateforme **PLATINOM** (Plateforme de technologie et d'Instrumentation pour l'Optique et les Micro-ondes), qui est le centre de ressources technologiques et d'instrumentation d'XLIM. Les recherches du projet MINT sont consacrées au développement de nouvelles fonctionnalités à base de MEMS/ NEMS (RF ou optiques), à l'introduction de nouveaux matériaux dans les composants hyperfréquences et optiques, et au développement de micro capteurs pour l'étude des biomatériaux.

***Chronologiquement, mes thématiques de recherche, se sont articulées autour des axes suivants:***

- **Conception, réalisation, développement et études de fiabilités des composants micro-électro- mécaniques type MEMS (Micro- Electro- Mechanical Systems) à vocation télécom radiofréquences et hyperfréquences**
  - Influence du type de couches diélectriques sur la durée de vie des composants capacitifs MEMS-RF
  - Etudes des mécanismes du chargement des couches diélectriques intégrant des composants MEMS-RF
  - Etude de la fiabilité et de la tenue en radiation gamma des MEMS-RF capacitifs (en collaboration avec l'ESA et Thales Alenia Space)
- **Conception, caractérisation basse et haute fréquence et intégration de matériaux innovants (carbone-diamant (DLC), matrices de diélectriques dopés avec des nano-clusters métalliques) dans des composants MEMS** (en collaboration avec le laboratoire SPCTS).
- **Conception et fabrication de micro- systèmes optiques et réalisation de systèmes lasers à fibres complexes à base de micro- miroirs type MOEMS, générant des impulsions ultracourtes et avec une fréquence de récurrence ajustable** (en collaboration avec le département Photonique de XLIM)
- **Composants et dispositifs innovants intégrant des matériaux intelligents à transition de phase pour la micro- et nanoélectronique et l'optique (couches minces et nano-composites, nano-fils de matériaux à transition de phase etc.). Réalisation de fonctions de commutation avancées (commutateurs, filtres, limiteurs de puissance RF) dans les domaines micro-ondes et optique à base de couches minces de VO<sub>2</sub> présentant une transition réversible de Mott** (en collaboration avec le laboratoire SPCTS et le département Photonique de XLIM).

Ces deux thématiques de recherche feront l'objet d'une présentation plus approfondie dans la deuxième partie du manuscrit.



## ACTIVITES D'ENCADREMENT, D'ANIMATION ET D'ADMINISTRATION DE LA RECHERCHE

### ENCADREMENT DE MASTERS/ STAGIAIRES, DE DOCTORANTS ET DE POST-DOCTORANTS

- Co- encadrement de plusieurs stages de recherches Master MR2 de 2003 à 2012 (10-12), d'un post-doctorant en 2010, et un post-doctorant en 2012, un stage ingénieur 2011 (Phelma INP Grenoble) et un stage M1 d'un étudiant japonais (M. Kazuhiro Tsuchiya de l'Université de Kagawa, 2012)
- Avec le laboratoire SPCTS (UMR CNRS 6638) sur les " Matériaux nano composites (couches minces, multi- couches, nano- agrégats) à propriétés commandables et leur intégration dans des systèmes optiques et microélectroniques avancés ", co-encadrement de deux post-doctorants (2010 et 2011) dans le cadre du Plan Pluri formation (PPF) XLIM –SPCTS.
- Evaluateur ou rapporteur dans des jurys de soutenance de Masters recherche (~2/ an) et examinateur dans plusieurs jurys de Thèses de Doctorat (10).
- Co- encadrement de plusieurs Thèses de Doctorat (4 thèse soutenues, 3 thèse en cours).

#### Thèses soutenues :

- En collaboration avec le département Photonique de XLIM, **"Systèmes lasers impulsions compacts et dispositifs hyperfréquences accordables basés sur l'intégration de composants MEMS"**, (2005- octobre 2007), **thèse soutenue le 17 octobre 2007 par David Bouyge**, en stage post-doctoral à l'Université Autonome de Barcelone (Espagne) de 2008 à 2010 et depuis octobre 2010 ingénieur en CDI à Thales Alenia Space (TAS) Toulouse (co-encadrement avec Pierre Blondy et Vincent Couderc).
- En collaboration avec le laboratoire SPCTS (UMR CNRS 6638) **"Etude, fabrication et conception de circuits et dispositifs micro-ondes et optiques à base de matériaux intelligents type VO<sub>2</sub>"** (2007- 2010), **thèse soutenue le 26 mars 2010 par Julien Givernaud**, actuellement ingénieur en CDI dans une PME en Limousin (co-encadrement avec Corinne Champeaux et pierre Blondy).
- En collaboration avec le département Photonique de XLIM, **"Systèmes lasers avancés utilisant des micro miroirs déformables à base de MEMS optiques"** (2007-2010), **thèse soutenue le 13 décembre 2010 par Marc Fabert**, en post-doc à l'Institut Fresnel/ CEA, Marseille, actuellement ingénieur de recherche au laboratoire XLIM (co-encadrement avec Vincent Kermene et Piere Blondy).
- Co-encadrement dans le département MINACOM d'une thèse sur le **"Développement de solutions d'encapsulation hermétiques et individuelles (wafer-level) pour les micro-commutateurs MEMS"** (2007-2010) **thèse soutenue le 15 décembre 2010 par Fabien Barriere**, actuellement en CDI dans une société en Limousin (co-encadrement avec Annie Bessaudou, Françoise Cosset et Pierre Blondy).

#### Thèses en cours :

- **"Composants et dispositifs accordables pour la microélectronique et l'optique à base de matériaux intelligents à transition de phase"**, commencée en octobre 2010, **doctorant: Jonathan Leroy**. (75% encadrement) Cette thèse est cofinancé par la Fondation

EADS dans le cadre du projet « **Métamatériaux dans le domaine THz basés sur la réponse non-linéaire des matériaux à transition de phase** »

- **"l'Etude de la Fiabilité des Micro-Commutateurs MEMS à Contact Ohmique", commencée en octobre 2011, doctorant E. Lemoine** (co-encadrement avec Pierre Blondy).
- **"Dispositifs avancés à l'échelle micro-et nano-métrique pour des applications type nano-oscillateurs à mémoire et «mémoires résistives» (Memristors)", commencée en octobre 2012, doctorant Amine Mennai** (co-encadrement avec Annie Bessaudou et Françoise Cosset).

## RESPONSABILITES DANS L'ANIMATION DE PROGRAMMES ET/OU DE PROJETS

- Participation au projet "Advanced MEMS for RF and Millimetre Wave Communications", FP6 – 507352 (FPS 6- EC AMICOM, Network of Excellence) (Coordinateur XLIM – Prof. P. Blondy), 01/01/2004- 30/06/2007.
- Responsable XLIM de la tâche 3 dans le cadre du projet Chaire d'excellence junior (titulaire Dr. R. Stoian) du Laboratoire TSI CNRS UMR 5516, Université Jean MONNET, St. Etienne : « Adaptive optimization of ultrafast laser-induced guiding structures in optical materials for photonic applications » (2005-2008).
- Responsable et coordinateur du projet ANR-07-JC-JC-0047 **Jeune Chercheur: "Advanced microwave and optical switching devices based on reversible Metal-Insulator Transition in VO2 thin films"**, 22/10/2007- 2011.
- Participation au contrat CNES « Etude de solutions de réglage innovantes pour la réalisation de filtres IMUX à supraconducteur » (partenaires : XLIM, LABSTICC, Thales Alenia Space, TAS) 2009-2010
- Responsable et coordinateur du Projet interne Institut Carnot – XLIM, **"Composants et dispositifs accordables pour l'optique et l'optique intégrée à base de matériaux intelligents à transition de phase"** 2008-2010.
- Participation au projet PEPS-ST2I (Projets Exploratoires) - FILAGAS « Développement de lasers à gaz fibrés pour les domaines spectraux non conventionnels » (coordinateur R. Jamier, Photonique –XLIM), 2009
- Participation au projet ESA "Nanomaterials Improved Electrostatic MEMS Actuators » (partenaires XLIM, Thalès Alenia Space- TAS Toulouse, NKUA(Grèce) and LAAS Toulouse), 2009-2010
- Responsable et coordinateur du Projet interne Institut Carnot – XLIM- « Métamatériaux accordables dans le domaine THz à base de matériaux à transition de phase et dispositifs MEMS, META-THz » 2011
- Participation au Projet exogène Réseau technologique de base (RTB), **"Caractérisation au niveau nanométrique de la transition de phase à la surface du matériau VO2"**), avec Centrale LETI Minattec – Plateforme de nano-caractérisation, 2010
- Participation au Projet exogène Réseau technologique de base (RTB), « Caractérisation mécanique des dispositifs MOEMS par profilométrie / vibrométrie interférométrique » avec CTU IEF-MINERVE, Institut d'Electronique Fondamentale– Université Paris Sud UMR CNRS 8622, 2010

- Responsable du projet conjoint entre les laboratoires SPCTS et XLIM concernant les « **Composites nano-structurés intelligents à propriétés commandables pour des applications électroniques et optiques avancées** », financé dans le cadre de l'appel à projets « thématique » 2010-2011 de la région Limousin.
- Responsable Minacom du projet multidisciplinaire MOSAIC (« **MOdelization and Simulation of Advanced Integrated Circuits** ») visant la modélisation des matériaux fortement non-linéaires (tels que le VO<sub>2</sub>) financé dans le cadre de l'appel à projet recherche commun entre laboratoires du PRES Limousin Poitou-Charentes.
- Responsable du projet de recherche « **Métamatériaux dans le domaine THz basés sur la réponse non-linéaire des matériaux à transition de phase** » financé par la Fondation d'entreprise EADS (2011-2013)
- Participation au projet ANR-ASTRID UV-factor « Laser à gaz fibré portable et ultra-compact pour les applications de bio-défense », porteur F. Gerome, XLIM-Photonique, 2011-2013.
- Responsable du projet de recherche « **Dispositifs à mémoire résistive (memristors) pour les nouveaux paradigmes de communications** » financé dans le cadre des appels à projets exploratoires XLIM-VIP 2013.
- Responsable du projet de recherche « **Dispositifs Neuromorphiques Actifs intégrant des matériaux non-linéaires à transition de Mott** » financé dans le cadre des appels à projets PEPS-INSIS 2013.
- Participation au projet de recherche « **Elaboration et caractérisation de nano-fils métalliques et/ou semi-conducteurs pour dispositifs optoélectroniques hybrides de récupération d'énergie** » financé dans le cadre des appels à projets "Structuration des Instituts" 2013 Région Limousin.
- **Plusieurs projets collaboratifs avec des partenaires industriels sont en cours de montage ou/et de négociation (NDA signées) autour de l'intégration de couches minces de matériaux à transition de phase pour des applications en électronique et optique.**

## ACTIONS DE DIFFUSION DE LA CULTURE SCIENTIFIQUE ET AUTRES RESPONSABILITES

### Participation à l'organisation de conférences, workshops, congrès et rencontres «portes ouvertes»:

- Présentation des activités de recherches développées dans le département/ laboratoire lors des visites organisées pour un public de spécialistes ou non
- Participation (représentant XLIM-Minacom) à la manifestation «Les Rendez-vous Carnot » (Lyon, 5-6 mai 2010), lieu de rencontre directe entre les partenaires économiques confrontés à une problématique de R&D et les laboratoires de recherche Carnot.
- Participation à la manifestation « Quelle recherche pour les STIC de demain ? » Colloque ANR-STIC du 5 au 7 janvier 2010, Cité des Sciences et de l'Industrie, Paris
- Membre du Comité Scientifique du "Colloque Francophone sur les Matériaux, les Procédés et l'Environnement" 31 mai- 06 juin 2009, Busteni, Roumanie
- Membre du Comité Scientifique du colloque francophone PLUridisciplinaire sur les Matériaux, l'Environnement et l'Electronique (PLUMEE 2011 et PLUMEE 2013), Limoges (France) 30 Mai -1 Juin 2011 et Bacau (Roumanie) 22-25 mai 2013.



#### Participation à des revues ou ouvrages de vulgarisation:

- Une partie des recherches sur les systèmes lasers innovants à base de MOEMS a été présentée dans le numéro 30 (août 2007) de la revue **Photoniques** (France) sur le titre "Système laser à fibre multi- longueur d'onde déclenché par MOEMS".
- Presse écrite -"2009, Une année avec le CNRS", "Des composants optiques ultra-performants " rapport scientifique du CNRS, 2010, p. 22
- Vulgarisation site web : "Réalisation de sources lasers impulsionnelles à base de micro-miroirs déformables type MEMS (Micro- Electro- Mechanical- System)" fait marquant Institut INSIS-CNRS, 2010, <http://www.cnrs.fr/insis/recherche/faits-marquants/2010/sources-lasers.htm>
- Vulgarisation site web : Eléments MOEMS (Figure 1.9b dans la deuxième partie, chapitre 1 du manuscrit) image du mois d'octobre 2008 sur le site de la Société Française d'Optique, [www.sfoptique.org](http://www.sfoptique.org).

#### Participations à des travaux d'expertise:

- Evaluations de plusieurs propositions de projets ANR dans le cadre de l'appel à projets Pnano (P2N) en 2008 (1) et 2010 (2), JCJC-SIMI3 en 2012 (1), ASTRID en 2013 (1).
- Rapport d'expertise technico-économique du dossier de demande d'aide de la société SEPAREX (dossier A09 09 003L) OSEO Innovation Lorraine
- Expertise scientifique des dossiers CIFRE pour l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie-ANRT (2013)

#### Responsabilités et activités de direction d'équipe ou de laboratoire:

- **Représentant élu du collège des chercheurs** CNRS au Conseil de laboratoire XLIM (depuis février 2012)
- **Co-responsable des sous-comités « Matériaux et procédés céramiques » et « Composants et circuits électroniques et photoniques »** dans le cadre du laboratoire d'excellence (labex)  $\Sigma$ -Lim entre les laboratoires XLIM et SPCTS.
- **Représentant du département MINACOM** à la commission d'audition et d'attribution des bourses doctorales de l'école doctorale S2IM (Sciences et Ingénierie pour l'Information, Mathématiques) (2011, 2012)

FIN

# **PARTIE 2.**

## **SYNTHESE DE TRAVAUX DE RECHERCHE RECENTS ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE**

## CHAPITRE 1.

### DEVELOPPEMENT DE MICRO MIROIRS DEFORMABLES (MEMS OPTIQUES) ET LEUR INTEGRATION DANS DES SYSTEMES OPTIQUES COMPLEXES

L'objectif initial de nos recherches, développés dans le cadre d'une collaboration entre le département Minacom et le département Photonique d'XLIM, visait principalement à obtenir un système laser à fibre émettant des impulsions courtes et de fortes puissances, avec des fréquences de répétition variables en associant un laser émettant en continu et une membrane métallique (micro-miroir) actionnée de manière électrostatique. Néanmoins, l'émergence de nouvelles fonctionnalités des dispositifs micro- opto- électro- mécaniques ou les MEMS optiques (MOEMS) en tant que commutateurs optiques, micro- scanners, atténuateurs variables, senseurs optiques etc. a permis d'adresser des applications innovantes dans des domaines comme les télécommunications, l'astrophysique, l'imagerie, la biologie etc.

Dans ce contexte, nos recherches se sont étendues à l'association du domaine des sources lasers avec les propriétés remarquables des dispositifs MOEMS (compacité, faible coût, faibles pertes d'insertion, achromaticité etc.) pour créer des systèmes lasers impulsions complexes (lasers fibrés avec des impulsions nanosecondes de forte puissance crête avec fréquences de récurrence ajustable, systèmes lasers bi- longueur d'onde, système de sélectivité spectrale en utilisant une source de continuum et une matrice de micro- miroirs etc.). Les résultats obtenus depuis le démarrage de cette activité (2005) se situent au niveau de l'état de l'art international, comme en témoignent les nombreuses publications et les interventions dans des conférences internationales majeures. Ils permettent d'envisager des développements innovants dans des domaines comme la bio-photoniques (diagnostic ou tri cellulaire, tomographie optique cohérente), télécommunications, microscopie confocale, radar optique, etc.

*Les résultats de recherche présentés ci-dessous ont été obtenus dans le cadre de deux thèses qui ont été co-encadrées avec le département Photonique : celle de David Bouyge ("Systèmes lasers impulsions compacts et dispositifs hyperfréquences accordables basés sur l'intégration de composants MEMS" (2005- 2007), soutenue le 17 octobre 2007) et celle de Marc Fabert ("Systèmes lasers avancés utilisant des micro- miroirs déformables à base de MEMS optiques" (2008-2010) soutenue le 13 décembre 2010).*

#### 1.1 MICROSYSTEMES MEMS POUR LA COMMUTATION OPTIQUE (MOEMS) ET LEURS ASSOCIATION AVEC DES CAVITES LASERS

Les MEMS ou encore les systèmes micro- électromécaniques, sont des dispositifs miniatures qui associent des éléments mécaniques, optiques, thermiques ou fluidiques à l'électronique. La multidisciplinarité est une caractéristique forte des activités de développement de ces dispositifs. La quasi-totalité des disciplines scientifiques ou techniques est concernée par la réalisation ou par l'utilisation de ces systèmes électromécaniques : l'électronique, la mécanique, les sciences des matériaux, l'optique, la thermique, la fluidique ou encore des domaines applicatifs comme les télécommunications, l'optoélectronique, la chimie, la médecine ou la biologie... On distingue plusieurs types de dispositifs MEMS qu'on peut classer, de manière relativement simpliste, en fonction de leurs grands domaines d'applications:

- les capteurs et actionneurs groupés sous le nom générique des **microsystèmes** ;
- les **MOEMS** ou les MEMS optiques,
- les **MEMS RF** pour des applications radio et hyper fréquences (RF et HF),
- les **BioMEMS**, développés pour la médecine et la biologie.

En particulier, le domaine de l'optique ouvre la possibilité d'intégrer des structures MEMS qui associent des fonctions électriques, mécaniques et optiques d'où leur appellation MEMS-Optiques ou MOEMS. Leur utilité première est de modifier la direction, l'intensité, ou la phase d'un faisceau

optique, en déplaçant un élément du dispositif (miroir, fibre...) ou en induisant une contrainte mécanique, électrique, fluide ou thermique ayant un effet optique [1, 2].

Comme l'ensemble des dispositifs MEMS, ils bénéficient du savoir-faire de la technologie microélectronique (micro-usinage en surface ou en volume), notamment en ce qui concerne le potentiel de miniaturisation et de fabrication de masse pour un faible coût. Un intérêt croissant se manifeste pour intégrer les MEMS dans les systèmes optiques à cause de leurs **faibles pertes d'insertion, leur faible diaphonie, leur achromaticité, et leur** insensibilité à la polarisation [1-4]. Les modes d'actionnement des micro actionneurs intégrés dans les dispositifs MOEMS sont en règle générale identiques à ceux intégrés au micro capteurs, MEMS RF ou BioMEMS : ils sont commutés à partir d'effets électrostatique, magnétique, piézoélectrique, thermique, électromagnétique, thermomagnétique... Les matériaux structuraux utilisés pour leur réalisation peuvent être des semi-conducteurs, des métaux, des couches piézoélectriques, des polymères...

Initialement les structures MEMS font leur apparition en optique pour la réalisation de miroirs à inclinaison variable. Un exemple désormais célèbre est le développement et l'implémentation par Texas Instruments de dispositifs MOEMS type DMDs (Digital Micromirror Display) dans les vidéoprojecteurs grand public. Ce qui a fortement contribué à l'explosion du marché des MOEMS [5]. Après leur émergence dans les domaines des télécommunications [2] et de l'imagerie [6, 7], les MOEMS présentent un grand potentiel de développement dans de nombreux secteurs (l'aérospatiale, l'astronomie, l'ophtalmologie, les biotechnologies...). Dans ce contexte, l'optique est devenue une des applications privilégiées de la technologie MEMS, générant une large gamme de microsystèmes regroupant les commutateurs optique, les matrices de micro miroirs, les modulateurs spatiaux de lumière, les composants pour l'optique adaptative, les matrices de microlentilles (parfois à focale variable), les micro capteurs optiques ou encore les MEMS diffractifs. La maturité de certains dispositifs, notamment en termes de fiabilité, d'herméticité et de réponse à des normes standards industrielles a abouti à leur industrialisation et leur commercialisation pour des marchés scientifiques ou grand public [4-7].

Historiquement, les premières associations de dispositifs MOEMS avec des cavités laser ciblent la réalisation de cavités laser type VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) accordables en longueur d'ondes, par la **déformation d'un des deux miroirs de Bragg de la cavité** [8-10]. En effet, une des solutions pour obtenir un laser accordable en longueur d'onde est de modifier la longueur de la cavité résonante. Le but est alors d'obtenir l'oscillation d'un mode longitudinal unique dans la cavité laser et de contrôler sa position par rapport à la zone de gain. Ce fonctionnement est spécifique aux sources ayant une petite taille. Dans l'exemple montré sur la Figure 1.1, la combinaison d'une source VCSEL et de la technologie MEMS a permis la réalisation d'un oscillateur laser accordable en longueur d'onde d'émission. La gamme d'accordabilité en longueur d'onde dépend, d'une part, de la largeur de la zone de gain, et d'autre part, de la variation de la longueur de la cavité. Dans cet exemple précis, la cavité laser est constituée de deux miroirs de Bragg parallèles à la surface du substrat (dont un mobile) et d'une région active constituée d'un ou plusieurs puits quantiques permettant la génération du faisceau laser (Figure 1.1). Les miroirs de Bragg sont réalisés par des couches alternant des indices de réfraction élevés et faibles. L'épaisseur de chaque couche est de l'ordre du quart de la longueur d'onde du laser dans le matériau, permettant ainsi d'obtenir un facteur de réflexion supérieur à 99% [8]. L'ajustement de la position du miroir de Bragg supérieur permet le contrôle de la fréquence de l'onde électromagnétique tout en conservant un aspect unimodal transverse. Une accordabilité de plus de 44 nm à une longueur d'onde centrale de 950 nm et pour une puissance de ~0.1 mW peut être ainsi obtenue [10].

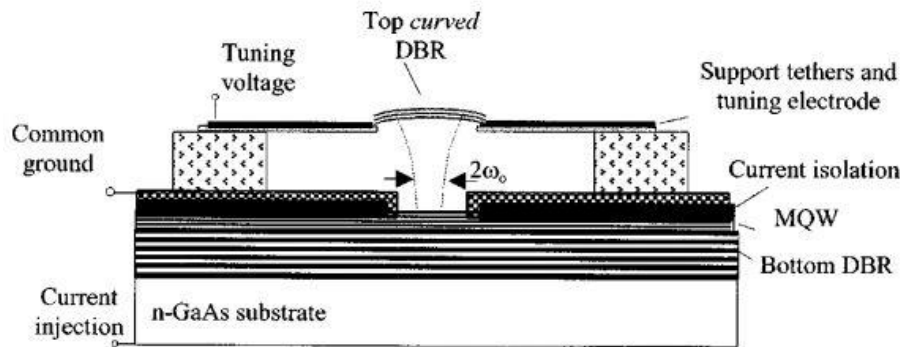


Figure 1.1. VCSEL à longueur d'onde d'émission accordable [10].

La première démonstration d'un laser à fibre impulsif déclenché par un micro miroir inclinable a été réalisée par des chercheurs de l'Institut de Micro Technologie de l'Université de Neuchâtel [11]. Le système laser à fibre intégrant un élément MOEMS (Figure 1.2) est formé d'une cavité laser comportant un milieu amplificateur à fibre dopée néodyme ( $\text{Nd}^{3+}$ ) pompé par une diode laser émettant à 810 nm. Le miroir de Bragg remplit le rôle de miroir de fond de cavité tandis que le miroir métallique de type MEMS réalise une modulation des pertes de la cavité laser. Selon l'orientation par torsion de la poutre qui maintient le micro miroir, un déclenchement de la cavité laser est réalisé et permet d'obtenir la génération d'impulsions laser énergétiques. Ce laser à MOEMS représentait encore en 2004 l'unique recherche publiée sur les oscillateurs à MOEMS en régime déclenché.

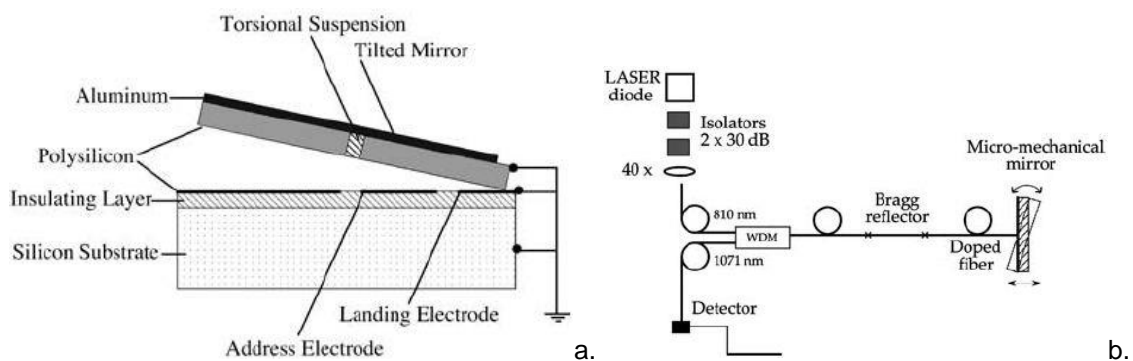


Figure 1.2. Schéma de coupe du MOEMS et architecture du système du laser [11].

L'alignement du miroir avec la fibre et la distance les séparant étant optimisés, le micro miroir orientable était activé de manière électrostatique ( $V_{ap} = 35 \text{ V}$ ) à une fréquence de 20 kHz. Dans cette configuration, le laser délivre des trains d'impulsions présentés sur la Figure 1.3.

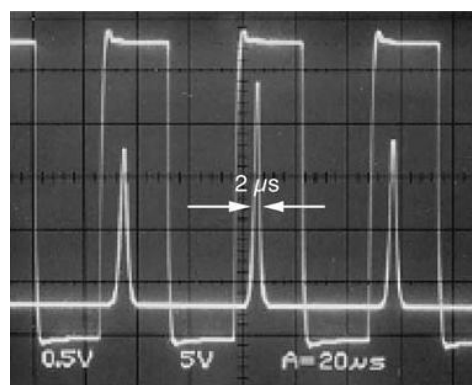


Figure1.3. Train d'impulsion obtenu avec un micromiroir de type "Tilt-Tip" pour une fréquence de modulation de 20kHz et une puissance de pompe de 515.8 mW [11].

La puissance crête des impulsions s'élève alors à 200 mW, soit 100 fois la puissance de l'émission continue. Il est à noter que la stabilité des impulsions en termes de puissance n'est pas très bonne comme on peut le voir sur la Figure1.3. Cette première démonstration montre néanmoins tout le potentiel de ces commutateurs électromécaniques pour la réalisation de sources lasers compactes.

## 1.2. GENERATION D'IMPULSIONS NANOSECONDES EN REGIME Q-SWITCH EN UTILISANT DE MICRO MIROIRS DEFORMABLES

Dans un amplificateur laser, l'oscillation laser est obtenue si le gain dans le milieu amplificateur (lieu d'inversion de population des ions sur leurs niveaux d'énergie supérieurs) est supérieur aux pertes dans la cavité. Ces pertes sont les pertes par transmission (pertes utiles pour l'utilisateur) et les pertes supplémentaires dues à l'absorption ou à la diffusion de la radiation à l'intérieur de la cavité ou sur les miroirs constituant la cavité laser. Une modulation rapide des pertes dans la cavité permet d'obtenir une émission laser sous forme d'impulsions plus ou moins brèves. Ces impulsions présentent une puissance crête généralement bien plus élevée que la puissance issue de la source de pompe [12].

Pour le régime impulsionnel on distingue plusieurs types de fonctionnements qui donnent des émissions laser très différentes. Nous allons brièvement rappeler ci-dessus les deux principes les plus importants pour le fonctionnement en régime impulsionnel d'un système laser, à savoir : **le régime dit déclenché (Q-switch)** et le régime dit **à synchronisation des modes longitudinaux (mode-locking)** [13, 14].

**Le fonctionnement laser en mode synchronisé** est basé sur la synchronisation des modes longitudinaux d'une cavité laser. En effet, lors d'un fonctionnement en régime continu, les modes longitudinaux oscillant dans la cavité sont indépendants et aucune relation de phase entre eux n'est fixée de manière durable. La superposition de l'ensemble de ces sources élémentaires indépendantes, d'un point de vue temporel, constitue alors un faisceau possédant un niveau de puissance moyenne quasi constant. Lors de l'introduction dans la cavité laser d'un composant actif (modulateur) ou passif (absorbant saturable) permettant une modulation rapide des pertes de la cavité, il est possible d'imposer une phase fixe entre les modes longitudinaux. Il en résulte alors un fonctionnement en régime impulsionnel court. La fréquence de répétition est fixée par la longueur  $L$  de la cavité laser ( $f_{rep} = c / 2L$ ) (exemple 150 MHz pour une cavité de 1 m). La durée des impulsions dépend alors de la largeur de la bande de gain et des conditions de dispersion au sein de la cavité laser. Des impulsions de quelques dizaines de picosecondes à quelques dizaines de femto secondes peuvent ainsi être engendrées [14, 15]. Il est à noter que la modulation temporelle induite dans la cavité doit être ultra rapide et de l'ordre de grandeur de la durée de l'impulsion que l'on souhaite engendrer dans le cas d'un absorbant saturable. Dans le cas d'un modulateur, la fréquence de modulation doit être égale à l'inverse du temps d'un aller-retour de la lumière dans la cavité.

On remarque tout de suite que les fréquences de commutation des MOEMS (généralement inférieures au MHz) vont imposer des longueurs de cavités très importantes ( $> 150$  m). Il est toutefois envisageable d'obtenir ce genre de fonctionnement avec un laser à fibre.

**Les sources lasers fonctionnant en mode déclenché (Q-switch)** constituent une autre grande famille de lasers impulsionnels [12, 13]. Ce régime de fonctionnement est totalement différent du régime à modes bloqués et reste proche de celui dit "relaxé". Dans ce cas, le système de pompage peut fonctionner de manière continue ou impulsionnelle. Cette technique, nommée "Q-switch" pour exprimer la commutation rapide du facteur de qualité  $Q$  de la cavité, consiste à utiliser un obturateur qui contrôle l'ouverture ou la fermeture du résonateur. Pendant le temps d'ouverture, les pertes dans la cavité ont une valeur élevée empêchant toute oscillation. Sous l'effet du pompage, l'inversion de population se construit peu à peu. Toutefois, tant que le gain reste inférieur au niveau de pertes, l'effet laser ne peut se produire. Lors de la fermeture de la cavité, les pertes du résonateur chutes rapidement et toute l'énergie accumulée est alors émise sous forme d'impulsions géantes. Dans le but



d'obtenir une émission stable et répétitive dans le temps (d'impulsion en impulsion), la fréquence de modulation est calculée pour obtenir une impulsion unique. La fréquence de modulation optimale est fonction de la vitesse de commutation de l'obturateur, du gain du laser, du temps de fluorescence et de la longueur de cavité. Il est à noter que dans le cas d'un obturateur passif, de type absorbant saturable, l'émission laser se cale directement sur la fréquence d'oscillation correspondant à une minimisation des pertes de la cavité. Cette fréquence dépend directement du temps de fluorescence des matériaux.

Dans les systèmes lasers conventionnels, des modulateurs actifs ou passifs sont introduits afin de générer des impulsions en mode déclenché (Q-switch) (éléments mécaniques, modulateurs acousto-optiques, électro-optiques, absorbants saturables etc.) [16-19]. Bien que ces dispositifs soient basés sur des technologies matures, ces solutions sont encombrantes et/ou relativement complexes. Chacune d'entre elles présentent des désavantages limitant leur potentiel d'intégration dans des systèmes laser compacts: fortes pertes d'insertions pour les modulateurs acousto-optiques, tensions trop élevées pour les solutions électro-optiques, encombrement trop important dans le cas des solutions mécaniques (chopper) ou encore un faible niveau de puissance laser avec les systèmes piézoélectrique de type réseau de Bragg accordables [19]. Insérer un élément mécanique miniature peut être une solution pour simplifier le système global mais seulement dans le cas où ce composant est compact et suffisamment rapide. Les composants type MOEMS, avec leur grande vitesse d'actionnement, leur faible consommation d'énergie, leur très faible coût de production et leur résistance face aux radiations laser peuvent répondre aux objectifs que l'on cherche à atteindre, à savoir le développement des modulateurs optiques compacts, simples et peu coûteux, adaptés à la génération d'impulsions lasers.

Dans ce contexte, l'application que nous avons ciblée concerne le développement de micro miroirs déformables pour une source laser pouvant émettre des impulsions brèves avec une accordabilité en fréquence de répétition. Si nous analysons très précisément le besoin des sources lasers en termes de qualité de miroir, il apparaît que la minimisation des pertes introduites dans un résonateur doit être la plus faible possible. Cette exigence se traduit alors par la mise au point d'un miroir possédant une très bonne qualité de surface et dont les déformations s'adaptent au profil du faisceau pour respecter les conditions de résonance.

Le principe de fonctionnement du micro miroir appliqué à la modulation des pertes d'une cavité laser est illustré sur la Figure 1.4. En appliquant une tension bipolaire entre l'électrode d'actionnement et la membrane, le miroir alterne entre état haut (MOEMS non-actionné) et état bas (MOEMS actionné) de par l'action de la force de rappel, obtenue par la raideur de la membrane, en opposition à la force électrostatique. Ainsi, sous l'action d'un champ électrostatique, la membrane passe d'une forme plane à une forme incurvée.

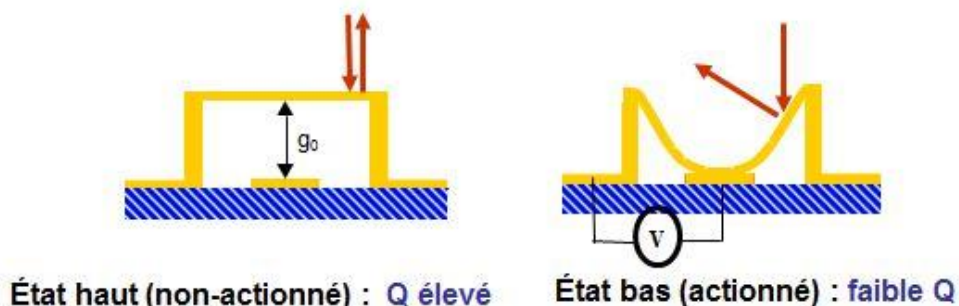


Figure 1.4. Principe de fonctionnement d'un élément MOEMS utilisé pour la déviation d'un faisceau incident au sein d'une cavité laser.

Lorsque cet élément actif est intégré dans une cavité laser (Figure 1.5), le changement de profil de la membrane, qui remplace un miroir de fond de cavité, permet une modulation des pertes et donc du facteur de qualité de la cavité laser. A l'état haut la membrane réinjecte le faisceau incident dans la cavité (facteur de qualité de la cavité élevé) tandis qu'à l'état bas le faisceau laser est défléchi hors de la cavité (faible facteur de qualité). Pour une modulation suffisamment rapide et efficace, l'oscillateur

laser entre dans un fonctionnement en mode déclenché et engendre des impulsions courtes de forte puissance.

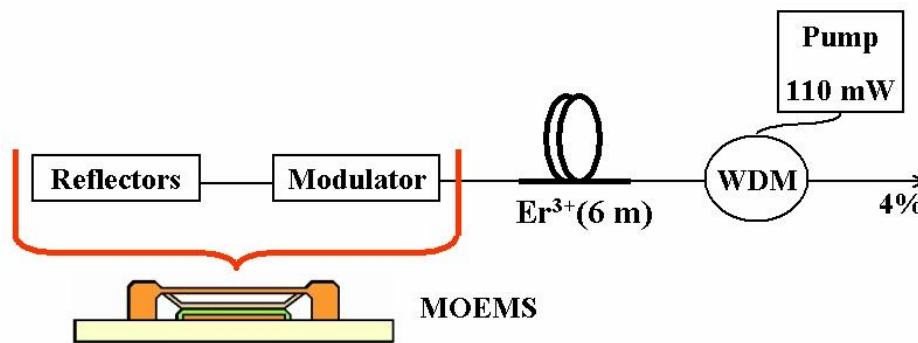


Figure 1.5. Principe d'intégration d'un micro-miroir MOEMS en tant que modulateur et miroir de fond de cavité dans un système laser à fibre.

L'avantage majeur de cette technique de modulation active réside dans la possibilité de contrôler la fréquence d'apparition de l'impulsion laser et de pouvoir la synchroniser avec tous types d'appareils sans gigue temporelle importante. La durée de l'impulsion optique émise dépend d'une part, du temps de fluorescence du milieu laser, de la puissance de pompe, du niveau de pertes engendré, et d'autre part, de la fréquence et de la vitesse d'ouverture de la porte temporelle. Dans ces conditions, nous chercherons à obtenir des composants présentant une vitesse d'actionnement, une modulation des pertes et une fréquence de modulation les plus hautes possible pour engendrer une impulsion optique très brève.

Nos premiers objectifs étaient donc d'étudier et de développer des composants micro-optoélectromécaniques permettant de moduler de manière rapide le flux lumineux contenu à l'intérieur d'une cavité laser. Un composant à position binaire semble donc être tout à fait approprié à notre application. Les composants MOEMS que nous avons développés se présentent sous la forme d'une membrane déformable suspendue, ancrée soit à une seule de leurs extrémités (type cantilever), soit à leurs deux extrémités (type pont).

### 1.2.1 DEVELOPEMENT DE MICRO-MIROIRS ACTIONNÉS ÉLECTROSTATIQUEMENT

Les micro-miroirs utilisés jusqu'à présent pour la modulation laser sont en général des structures inclinables, complexes à réaliser et peu adaptées à cette fonction (angle de déflexion et vitesse de commutation trop faibles). Dans le cadre de nos travaux, nous avons opté pour des micro-miroirs à membrane déformable sous l'action d'une force électrostatique, donnant ainsi accès à des dispositifs plus compacts, plus simples et potentiellement plus rapides et mieux adaptés à la fonction que l'on souhaite leur attribuer.

Avant la mise en place du système laser à MOEMS, il était important de réaliser des composants présentant un certain nombre de caractéristiques optiques, électriques et mécaniques pour assurer un bon fonctionnement du laser. De par, leur double fonction miroir / modulateur, leurs dimensions microscopiques et leur fabrication en grande quantité, ces composants présentent un potentiel intrinsèque pour accroître la compacité et réduire les coûts des systèmes lasers comparés aux autres dispositifs actifs ou passifs. Cependant, comme tout composant optique, les micro-miroirs se doivent de présenter un très bon état de surface, c'est-à-dire une rugosité inférieure à  $\lambda/20$ . L'utilisation des fines couches de métaux (or obtenu par évaporation thermique) pour former la membrane déformable devrait satisfaire cette exigence et offrir un fort taux de réflectivité du faisceau sur la membrane. Également, dans un système laser fonctionnant en mode déclenché, un des paramètres critiques pour engendrer des impulsions de courtes durées est la vitesse de commutation du modulateur. Ce paramètre est, dans une première approximation, inversement proportionnel à la fréquence de



résonance mécanique de la membrane ( $F_{res}$ ). Cette caractéristique des membranes dépend fortement de leur raideur. Ainsi, une constante de raideur de la membrane plus élevée aboutit à des impulsions plus brèves, à des fréquences de récurrence plus rapides, et des puissances crêtes potentiellement plus élevées. Les paramètres de fabrication de la membrane (dimensions, géométrie des ancrages, épaisseur, vitesse de dépôts, température, pression..) ont été optimisés pour obtenir une forte raideur de la membrane avec de faibles tensions d'actionnement.

Nous présentons ici deux structures développées au laboratoire. Il s'agit de membranes métalliques suspendues, **une première ancrée des deux côtés (type « pont »)** et une autre **ancrée d'un seul côté (type « cantilever »)**. Comme nous l'avons mentionnée précédemment, la modulation des pertes au sein d'une cavité laser peut conduire à deux fonctionnements impulsionnels différents, les deux n'ayant pas les mêmes exigences d'un point de vue modulateur optique. Intuitivement, avant même de quantifier leurs caractéristiques, il apparaît qu'en offrant un angle de déflexion plus important qu'une structure de type pont, la structure de type cantilever est mieux adaptée au régime de fonctionnement déclenché (Q-switch). En revanche, comme nous le verrons par la suite, un MOEMS de type pont donne accès à des fréquences de modulation plus élevées qu'un MOEMS de type cantilever à dimensions égales. Cette propriété associée destine les MOEMS de type pont au régime de fonctionnement laser à synchronisation de modes.

## COMPOSANTS DE TYPE « PONT »

Dans un premier temps, nous avons utilisé comme miroir déformable des commutateurs développés initialement pour des applications RF/ micro-ondes (type MEMS RF) car la membrane déformable en or peut être utilisée également comme miroir. Dans ce cas, les micro-miroirs de type pont, consistent en une membrane en or évaporé d'une épaisseur de 500 nm soutenue à ses deux extrémités par des ancrages de 3  $\mu\text{m}$  d'or électrolysé afin d'augmenter sa raideur. Les membranes sont suspendues (2.2  $\mu\text{m}$ ) au-dessus d'une électrode d'actionnement recouverte par une fine couche de diélectrique ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 200 nm) pour assurer l'isolation électrique durant l'actionnement. Les photos par microscopie électronique à balayage (MEB) sur la Figure 1.6 montrent un composant MEMS typique développé au laboratoire, de dimensions 160 x 240  $\mu\text{m}^2$ . Les membranes métalliques ont une rugosité faible ( $\sim 2 \text{ nm rms}$ ) et un comportement mécanique, électrique et optique reproductible. Les paramètres de fabrication de la membrane (dimensions, géométrie des ancrages, épaisseur, vitesse de dépôts, température, pression..) ont été optimisés pour obtenir une forte raideur de la membrane avec de faibles tensions d'actionnement (15-35 Volts). Actionnés par une tension bipolaire pendant un milliard de cycles les composants ne présentent aucun signe de dégradation électrique ou mécanique. En appliquant une tension bipolaire entre l'électrode inférieure et la membrane, le miroir alterne entre état haut (MOEMS non-actionné) et état bas (MOEMS actionné) sous l'action de la force de rappel, obtenue par la raideur de la membrane, en opposition à la force électrostatique.

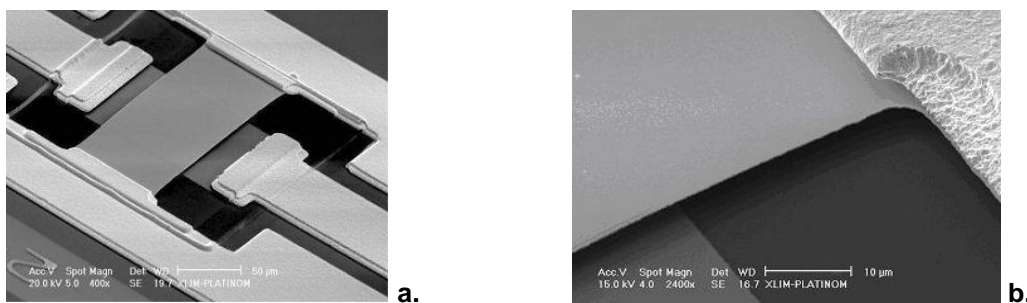


Figure 1.6. Images MEB d'un micro-miroir de type pont (a), et détail d'un ancrage de la membrane (b).

Par la suite, le design de ce type de composants MOEMS a été largement simplifié notamment par le remplacement des électrodes inférieures d'actionnements individuels (propres à chaque composant), avec une électrode globale, commune à tous les composants, matérialisée par un substrat de Si

basse- résistivité couvert par une couche d'oxyde de silicium. Les composants MOEMS que nous réalisons donc par la suite sont fabriqués en utilisant le micro-usinage en surface des substrats de silicium (Si, d'une épaisseur d'environ 525  $\mu\text{m}$ ) recouverts d'une côté par une couche de dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) d'épaisseur 1  $\mu\text{m}$  (Figure 1.7). Les micro-miroirs et les électrodes supérieures permettant leur actionnement électrostatique sont fabriqués sur le substrat Si en utilisant dans certains cas seulement deux masques de lithographie : un pour définir les motifs des résines sacrificielles permettant d'obtenir les membranes métalliques suspendues et un autre pour définir la forme des membranes et les électrodes supérieures. Le principe de fonctionnement des composants est illustré sur la Figure 1.7.a: à l'état non-actionnée, les membranes sont en position haute et un faisceau laser incident normal à leur surface est réfléchi dans la même direction ; en appliquant une tension suffisante entre l'électrode inférieure (le substrat isolé par la couche diélectrique) et les micro-miroirs, les membranes sont actionnées et fléchissent vers le substrat. La surface incurvée des membranes dévierait les faisceaux laser dans une direction différente de celle incidente.

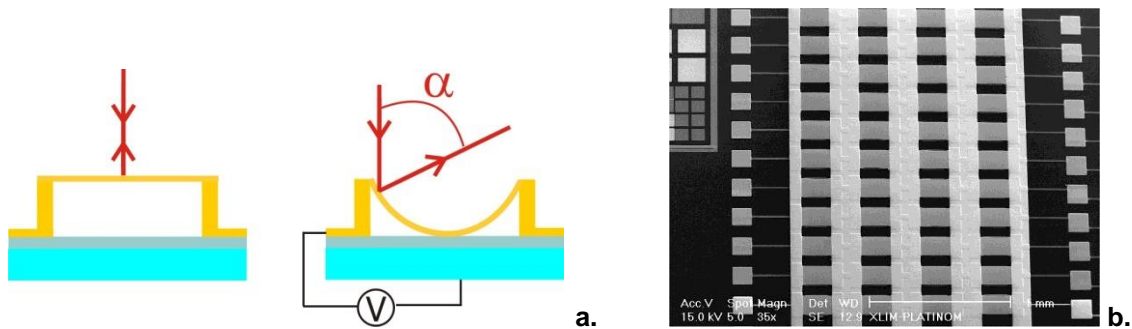


Figure 1.7. a. Schéma d'actionnement d'un MOEMS de type pont et b. photo MEB d'une matrice de micro-miroirs type pont.

Cependant, si la surface d'un composant individuel peut être importante (quelques dizaines de micromètres de côté), seule une petite zone (quelques micromètres carrés) angulairement discriminante, correspondant aux flancs du pont, est exploitée (Figure 1.8).

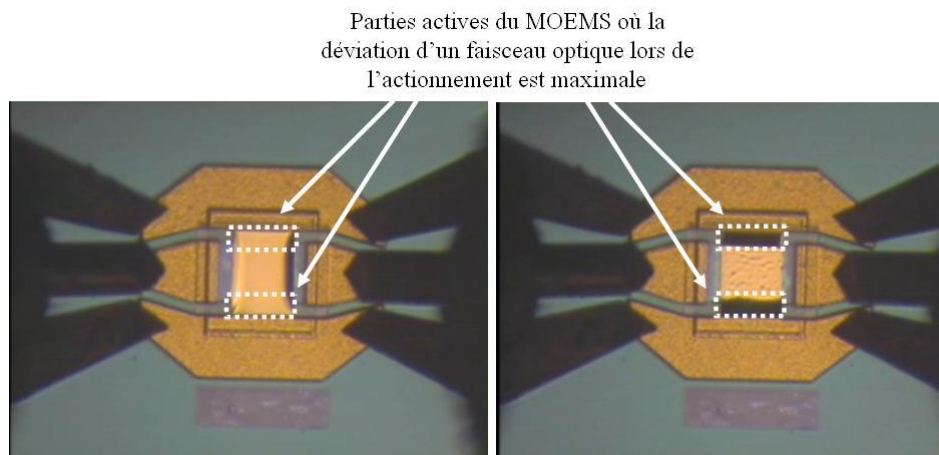


Figure 1.8 : Illustration des parties optiquement actives (permettant la déflexion d'un faisceau laser incident) des composants MOEMS type pont, à l'état non-actionné (à gauche) et à l'état actionné (à droite).

Ce type de fonctionnement impose un alignement optique très précis et une forte densité de puissance localement. Pour pallier à ces deux défauts, nous avons développé de nouveaux composants de type « cantilever », avec un pouvoir de discrimination optique beaucoup plus important.

## COMPOSANTS DE TYPE « CANTILEVER »

Dans cette configuration, la membrane métallique n'est plus fixée qu'à une seule extrémité, on parle alors de poutre encreée d'un seul côté ou de cantilever. Le principe de fonctionnement de ce type de dispositif et un exemple typique de réalisation sont présentés sur la Figure 1.9. Lorsque la membrane est actionnée, celle-ci renvoie la lumière incidente dans la cavité laser qui présente alors un coefficient de surtension ou facteur de qualité élevé. Au repos (état non-actionnée de la membrane), le faisceau est défléchi et les pertes intra-cavité du système laser sont élevées. La poutre possède à la fois une surface utile et une discrimination angulaire bien supérieures à celles d'un MOEMS de type pont. Les cantilevers ont intrinsèquement une tenue au flux bien meilleure qui est liée à l'augmentation de la surface utile du composant et à son épaisseur accrue ( $1.5\ \mu\text{m}$  au lieu de  $0.5\ \mu\text{m}$ ). De plus, l'angle de déflexion (entre  $10^\circ$  et  $20^\circ$ ) qu'ils imposent au faisceau optique peut être deux fois plus important qu'avec les micro-miroirs de type « pont ». La discrimination entre l'état haut et l'état bas s'en trouve alors considérablement améliorée. Ce qui non seulement permet de dispenser la source laser de système d'imagerie pour focaliser le faisceau sur le MOEMS mais aussi d'étendre sa plage de fréquences de modulation.

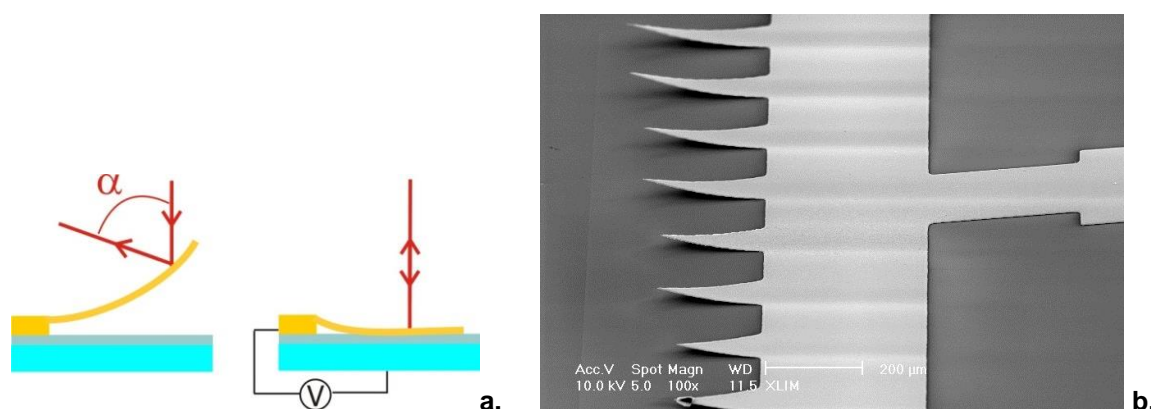


Figure 1.9. a. Principe de fonctionnement d'un MOEMS type cantilever et b. image MEB des réseaux de modulateurs électromécaniques MOEMS en configuration cantilevers (image du mois d'octobre 2008 sur le site de la Société Française d'Optique, [www.sfoptique.org](http://www.sfoptique.org))

Pour obtenir ce type de membranes incurvées vers le haut nous déposons une fine couche de Cr par évaporation thermique (dite "couche de stress") sur une couche d'or électrolysée dite "structurale" (Figure 1.10). Les dimensions des membranes varient de  $50 \times 50\ \mu\text{m}^2$  à  $300 \times 500\ \mu\text{m}^2$  et elles ont une forme rectangulaire ou triangulaire. La simulation de leur fréquence de résonance mécanique donne des valeurs comprises entre 6 et 240 kHz. Non actionnée, la poutre du cantilever est redressée avec un profil pratiquement parabolique et une flèche qui dépend de sa longueur (Figure 1.10). Si ce redressement est plus important avec une poutre longue conduisant à une discrimination angulaire intra-cavité plus grande, son temps de commutation est plus long. Un compromis est alors à trouver.

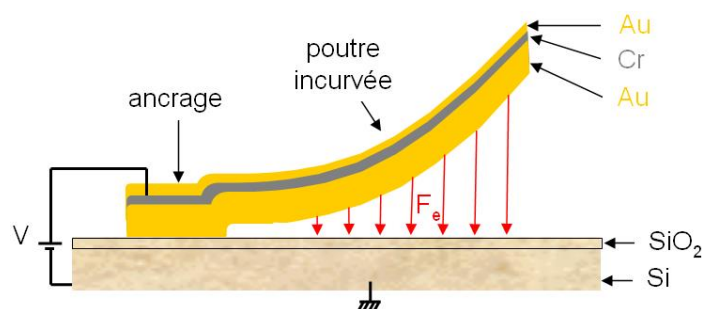


Figure 1.10. Conception des membranes type cantilever incurvées vers le haut.

Des exemples de composants MOEMS type cantilever pour des applications laser sont montrés sur les images de la Figure 1.11. On peut noter la forte discrimination de réflectivité des membranes selon qu'elles soient non-actionnées (état haut (a)), ou qu'elles soient actionnées (état bas (b)). De même, sur la Figure 1.12, on observe une grande différence de réflectivité entre les ancrages plats et les membranes incurvées d'un ensemble de 8 cantilevers de forme triangulaire de largeur de base 200  $\mu\text{m}$  et de longueur 250  $\mu\text{m}$  lors de leur actionnement collective/ synchrone (Figure 1.12.c) ou individuel (Figure 1.12.b).

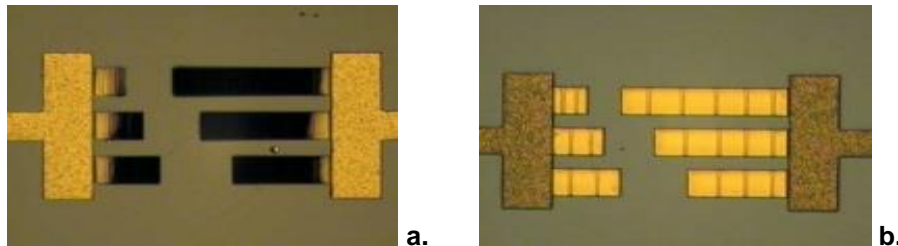


Figure 1.11. Micro-miroirs en or de type cantilever à l'état haut (a) et actionnées, à l'état bas (b).

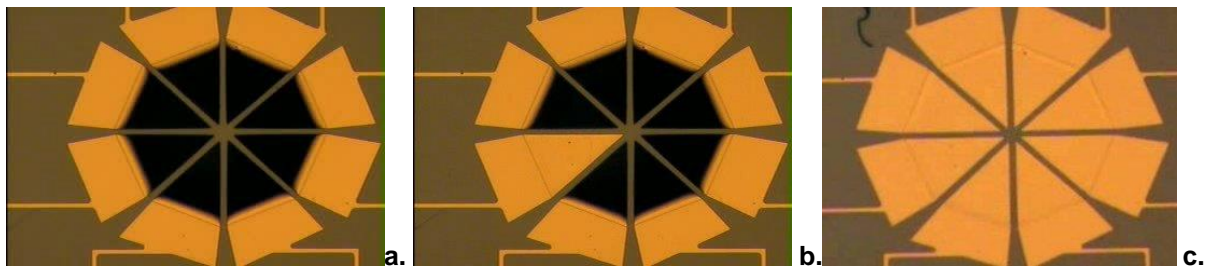


Figure 1.12. Séquences des images par microscopie optique montrant un arrangement de huit membranes incurvées type cantilever (a) et leur actionnement asynchrone (b) ou synchrone (c).

Un autre avantage des MOEMS de type « cantilever » concerne leur fiabilité. En effet, la génération d'impulsions lasers nécessite l'augmentation du coefficient de surtension de la cavité pendant un temps  $\tau$  très court. Dans le cas du cantilever, le temps d'actionnement du MOEMS est synchrone avec ce temps  $\tau$  alors que dans le cas du micro-miroir de type « pont », la tension est appliquée pendant le temps complémentaire de  $\tau$  (cavité ouverte). Par conséquent, la durée d'actionnement des cantilevers (le temps à l'état bas) est très inférieure à celle imposée aux micro-miroirs de type « ponts ». Ceci améliore la fiabilité du composant en minimisant l'accumulation de charges électriques dans le diélectrique qui fait office d'isolant entre les deux électrodes (le substrat fixe et la poutre mobile). Cette accumulation est à limiter car, à terme, elle peut stopper le déplacement de la poutre ou de la membrane. Il est également à noter que la membrane d'un MOEMS retourne après actionnement à sa position de repos grâce à sa raideur, ce qui provoque quelques mouvements d'oscillations amorties. L'amplitude de ces oscillations peut suffire à perturber la discrimination entre les deux états de surtension de la cavité (ouverte et fermée). Les conséquences de ces oscillations sur le comportement de la cavité sont bien moindres lorsque ce phénomène est présent pendant le temps où la surtension de cavité est basse (modulation avec des MOEMS de type cantilever) que lorsqu'elle est haute (modulation avec des MOEMS de type pont).

### 1.2.2 SOURCE LASER A FIBRE DECLENCHEE PAR DES MOEMS DE TYPE PONT [20, 21]

**D**ans un système laser fonctionnant en mode déclenché un des paramètres critiques pour engendrer des impulsions de courtes durées est la vitesse de commutation du modulateur. Dans notre cas, ce paramètre est déterminé, dans une première approximation, par la fréquence de résonance mécanique de la membrane ( $F_{\text{res}}$ ). Cette caractéristique des membranes



dépend de leur raideur et de la température de travail. Les mesures expérimentales de la fréquence de résonance mécanique des membranes à température ambiante donnent des valeurs comprises entre 65 kHz et 170 kHz pour des dimensions de membranes comprises entre  $80 \times 140 \mu\text{m}^2$  et  $160 \times 270 \mu\text{m}^2$ , correspondant à des temps de commutation de notre élément modulateur, inversement proportionnel à  $F_{\text{res}}$ , de l'ordre de 2 à 5  $\mu\text{s}$ .

Les micro-miroirs type pont ont été intégrés dans des lasers à fibre dopée aux ions  $\text{Er}^{3+}$  (EDFA) dans la configuration présentée sur la Figure 1.13. La fibre amplificatrice est pompée directement dans le cœur, à travers un multiplexeur en longueur d'onde (WDM 980/1550 nm), par une diode laser émettant à la longueur d'onde 980 nm avec une puissance de 100 mW. La longueur de la fibre est de 6 m afin d'obtenir une bonne absorption. Le réflecteur de sortie (réflectivité de 4%) est simplement obtenu en clivant droit l'extrémité de la fibre du WDM. Le MOEMS joue, ici, le rôle du miroir de fond de cavité. En même temps, un système d'imagerie basé sur deux lentilles confocales est introduit pour augmenter la réinjection du faisceau laser dans la fibre amplificatrice.

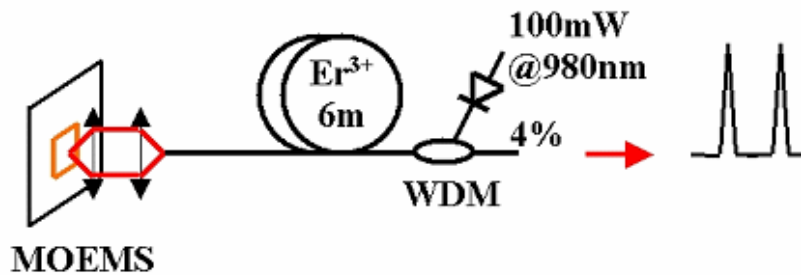


Figure 1.13. Configuration de la cavité laser type EDFA.

À l'état haut la membrane réfléchit le faisceau incident dans la cavité (facteur de qualité de la cavité élevé) tandis qu'à l'état bas le faisceau laser est dévié hors de la cavité (faible facteur de qualité). Ainsi, un faisceau laser focalisé sur la membrane est dévié d'environ  $9^\circ$  durant l'activation de l'élément MOEMS, et la différence de réflectivité de la membrane entre ses deux états est de 45%, ce qui est suffisant pour moduler les pertes optiques de la cavité. Pour une modulation suffisamment rapide et efficace, l'oscillateur laser entre dans un fonctionnement en mode déclenché et engendre des impulsions courtes de forte puissance (Figure 1.14).

Dans cette configuration nous obtenons des trains d'impulsions avec des fréquences de répétition (déterminées par et égales aux fréquences d'actionnement des micro-miroirs) continûment accordable de 20 kHz à 120 kHz. Avec un miroir de dimensions  $80 \times 140 \mu\text{m}^2$ , la durée des impulsions est de 320 ns pour des fréquences de l'ordre de 30 kHz (Figure 1.14.a) et augmente jusqu'à plus de 500 ns pour les fréquences les plus élevées (Figure 1.14.b).

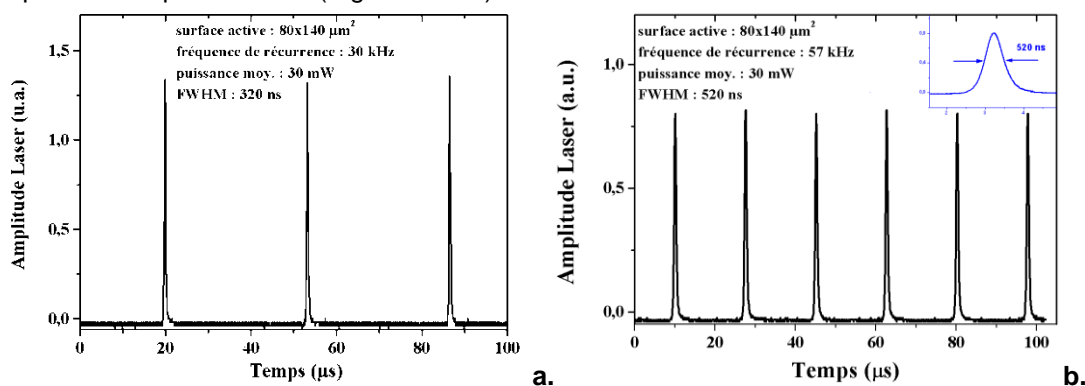


Figure 1.14. Train d'impulsions et spectre d'émission en sortie de l'EDFA.

Les micro-miroirs (membrane déformable sous l'effet d'un champ électrostatique) présentent de bonnes caractéristiques optiques, électriques et mécaniques. Ces premiers résultats montrent que de tels composants MOEMS, présentant un faible coût de fabrication, ont un grand potentiel d'intégration dans les microsystèmes laser. Leur implantation dans un oscillateur fibré a permis d'obtenir des impulsions nanosecondes de forte puissance crête, une bonne stabilité du déclenchement, un seuil de

dommage autour de  $250 \text{ MW} / \text{m}^2$  et avec des fréquences de récurrence ajustables pour une émission de sortie laser de 1550nm.

# Deformable micro-electro-mechanical mirror integration in a fibre laser *Q*-switch system

A Crunteanu, D Bouyge, D Sabourdy, P Blondy, V Couderc,  
L Grossard, P H Pioger and A Barthélemy

XLIM Research Institute—UMR CNRS 6172, Faculté des Sciences et Techniques, Université de Limoges, 87060 Limoges, France

E-mail: [aurelian.crunteanu@xlim.fr](mailto:aurelian.crunteanu@xlim.fr)

Received 3 October 2005, accepted for publication 3 January 2006

Published 1 June 2006

Online at [stacks.iop.org/JOptA/8/S347](http://stacks.iop.org/JOptA/8/S347)

## Abstract

We demonstrated active *Q*-switching of an erbium-doped fibre laser using a deformable metallic micro-mirror. The electrostatically actuated micro-mirror acts as one of the laser cavity reflectors and, at the same time, as a switching/modulator element. When actuated, its shape changes from planar to a concave curvature, allowing control of the *Q*-factor of the laser cavity. The mirror/switching element is small, compact, highly reflective and achromatic, with a great integration potential. The laser system operates at frequencies between 20 and 120 kHz and generates short pulses (FWHM down to 300 ns) and high peak powers, up to 160 times greater than the continuous emission.

**Keywords:** optical MEMS, deformable mirror, fibre laser, *Q*-switch

(Some figures in this article are in colour only in the electronic version)

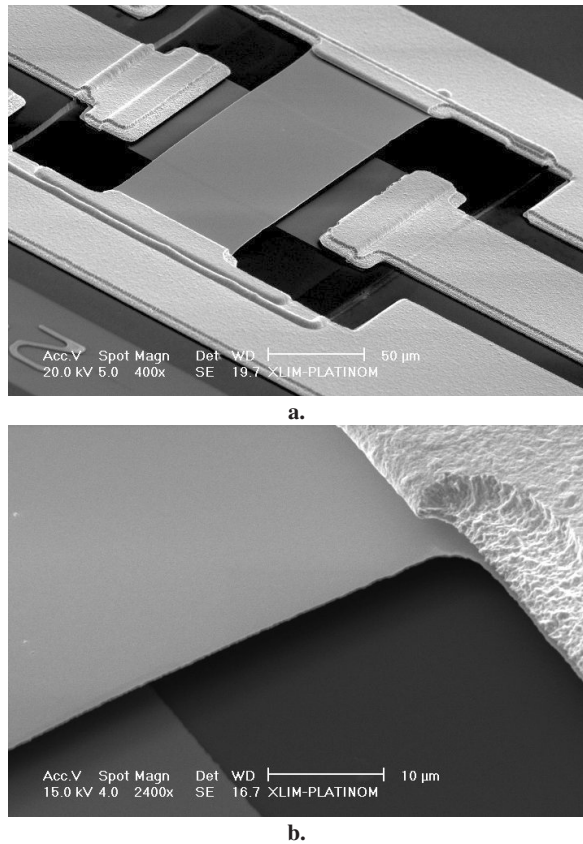
## 1. Introduction

The association of micro-optics and micro-electro-mechanical systems (MEMS) creates a new and relatively broader area of devices, the micro-opto-electro-mechanical systems (MOEMS). Their properties (compact, scalable, low insertion losses, low cross-talk, polarization insensitive) along with their emerging functionalities as optical switches, micro-scanners and variable attenuators/shutters find extensive applications in telecommunications, astrophysics, biology and imaging etc [1]. Along with optical switches, tunable or high-power micro-lasers are key components in future optical networks. Within this framework MOEMS technology has been shown to be very promising for the fabrication of miniaturized tunable [2] or pulsed fibre lasers [3], adding merits of compactness, high speed and batch, and low-cost production.

In order to generate a pulse in a conventional *Q*-switched fibre laser, a passive or active modulator (acousto-optic or electro-optic, saturable absorbers, mechanical components)

has to be introduced into the cavity [4]. Although the conventional solutions for laser *Q*-switch generation are based on solid, mature technologies, most of them present inherent disadvantages that restrain their integration in miniature, compact laser systems: degradation of the beam quality, high insertion losses for the acousto-optic modulators [5], high voltages and low modulation frequencies for the electro-optics solutions [6], bulkiness for mechanical choppers, low laser power level operation for piezoelectric Bragg gratings systems [7] or lack of control of frequency and pulse width for the passive modulators.

Our paper describes a fibre laser system coupled with an electrostatic-actuated micro-mirror, which acts as one of the two reflectors of the laser cavity and as a switching/modulator element. The goal is to obtain laser systems emitting short, high-power pulses and having a variable repetition rate. The advantages of such an element reside in its low fabrication cost and its high potential for integration in a compact micro-system.

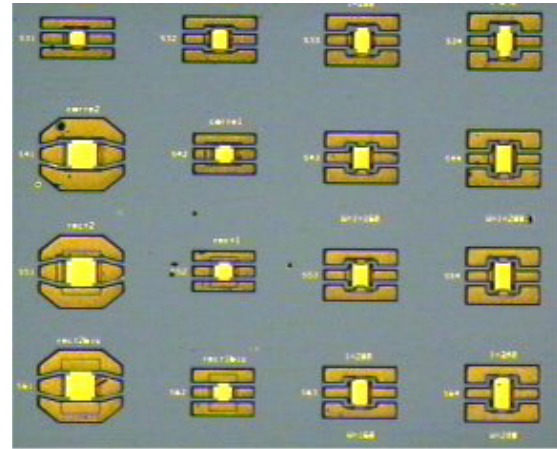


**Figure 1.** Scanning electron micrograph (SEM) of a typical metallic micro-membrane (a) and a closer view of the suspended mirror over the actuation electrode (b).

## 2. Electrostatically actuated mirror

The fabricated micro-mirror consists of a 500 nm thick thermal evaporated gold membrane (bridge-type) suspended over an actuation electrode placed 2.2  $\mu\text{m}$  underneath the membrane and covered with a dielectric thin film ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 200 nm thickness). The bridge is sustained at its extremities by thick metallic anchorages (made of plating gold) in order to increase its stiffness. The fabrication steps follow the general MEMS manufacture technology and are similar to those described in [8]. Briefly, the electrodes (signal and ground lines) were patterned on a 5/150 nm thick Ti/Au bi-layer made by thermal evaporation on Si or quartz substrates. Then, the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dielectric layer was deposited either by pulsed laser deposition (PLD) or plasma enhanced chemical vapour deposition (PECVD). A 2.2  $\mu\text{m}$  thick photoresist layer (Shipley, S1828) was spin-coated and lithographically patterned as the sacrificial layer and a 0.5  $\mu\text{m}$  thick gold layer was further evaporated to form the bridge. The anchors of the bridge and the electrodes were thickened up to  $\sim 3 \mu\text{m}$  using gold electroplating in order to increase the stiffness of the device. The last steps included patterning of the mirrors using wet etching followed by releasing the suspended membranes (by removing the sacrificial layer using acetone and isopropyl alcohol).

Figure 1 shows a SEM micrograph of such a mirror having dimensions of  $240 \times 160 \mu\text{m}^2$ , which is the largest element of



**Figure 2.** Optical microscopy overview of micro-mirrors with different dimensions.

an array (partly shown in figure 2) containing 30 membranes with different dimensions (the smallest ones having an area of  $120 \times 60 \mu\text{m}^2$ ).

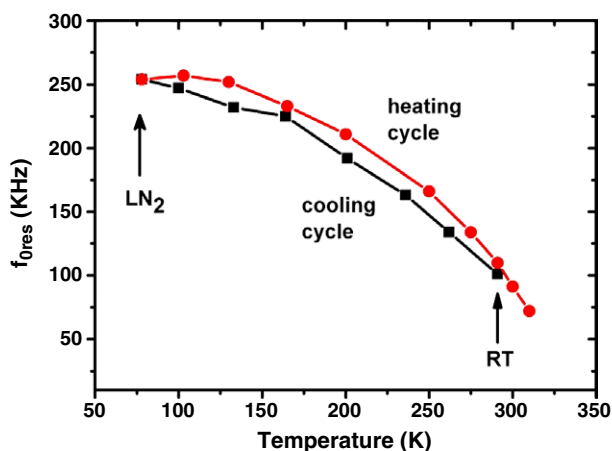
When applying a pulsed modulated voltage between the membrane and the electrode, the bridge simply moves down and up (piston-like) by combining the action of the electrostatic force (between the bottom electrode and the bridge) and that of the mechanical restoring force given by the bridge stiffness. The dielectric assures an electrical isolation between the membrane and the landing electrode during the actuation. The parameters for the membrane fabrication (thickness, deposition rate, component dimensions, distance to the landing electrode) were optimized to obtain high-stiffness bridges (measured spring constants between 20 and  $70 \text{ N m}^{-1}$ , depending on the dimensions) with low switching times (1–3  $\mu\text{s}$ ) and low actuation voltages (15–35 V). The mirrors have low roughness ( $\sim 2 \text{ nm rms}$  as recorded by AFM) and reproducible mechanical and electrical behaviour. Most of them were actuated for more than 1 billion cycles with a bi-polar waveform voltage without any sign of mechanical degradation or switching failure.

When actuated, the membranes act like a mirror with variable curvature, passing from planar (in the non-actuated, off-state) to a curved-concave shape (in the actuated, on-state). Depending on the membrane dimensions, the maximum radius of curvature may vary from 1.45 mm for the 160  $\mu\text{m}$  long bridges to 4.45 mm for the longest ones (240  $\mu\text{m}$  long). In the off-state, the membrane reflects back into the cavity the incident radiation (high  $Q$  factor cavity), while in the on-state the incident beam is deflected under an angle of  $\sim 9^\circ$  outside the cavity (low  $Q$ -factor laser cavity). When the  $Q$ -factor modulation became fast enough the laser system reached the  $Q$ -switching regime (generation of narrow, high-power pulses).

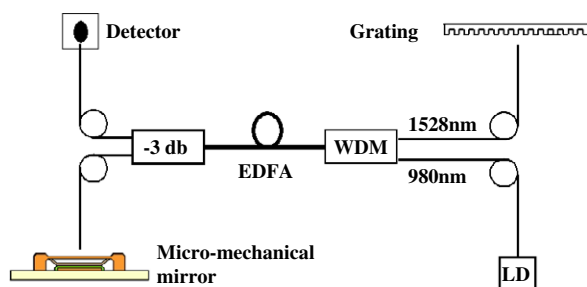
## 3. Pulsed fibre laser system

An important parameter for generating high-energy pulses in a  $Q$ -switched fibre laser is the modulator speed. In our case, this parameter translates into the mirror-operation speed,





**Figure 3.** Mechanical resonant frequency evolution with temperature for a  $240 \times 160 \mu\text{m}^2$ -area micro-mirror.

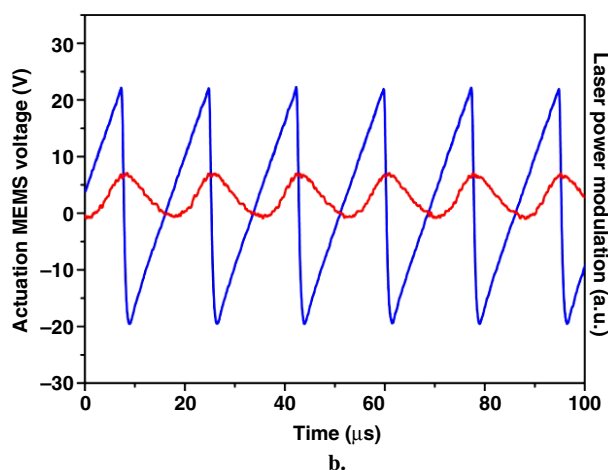
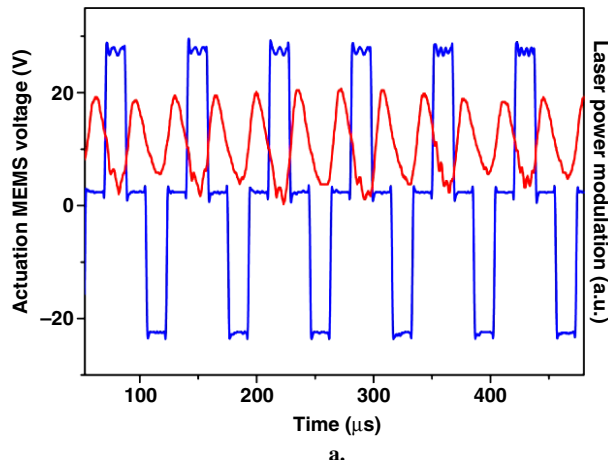


**Figure 4.** Schematic diagram of the pulsed fibre laser system using micro-mirror modulation.

which is determined, in a first-order approximation, by the mirror's mechanical primary resonant frequency. The higher this frequency, the faster the laser modulation. The goal is then to reach the optimal modulation frequency to obtain maximum efficiency of the *Q*-switch operation.

Depending on the dimensions, the mirrors have a relatively high mechanical resonant frequency at room temperature (RT), ranging from  $\sim 90$  kHz (for the  $240 \times 160 \mu\text{m}^2$ -area membranes) up to 170 kHz (for the  $120 \times 60 \mu\text{m}^2$  ones). Figure 3 shows the temperature evolution of the resonant frequency for a  $240 \times 160 \mu\text{m}^2$ -area mirror undergoing a cooling–heating cycle between RT and liquid nitrogen ( $\text{LN}_2$ ) temperature (77 K). During the cooling cycle, the resonant frequency increases up to 250 kHz but the membrane recovers its mechanical behaviour when heated back to RT.

Figure 4 shows a simplified set-up of the pulsed fibre laser oscillator with integrated micro-mirrors. The fibre laser is based on an  $\text{Er}_3^+$ -doped fibre amplifier (EDFA), longitudinally pumped by a laser diode emitting at 980 nm, spliced to a wavelength division multiplexing (WDM) coupler enabling the use of a grating ( $1200 \text{ tr mm}^{-1}$ , 94% reflectivity at 1064 nm) as an output reflector. On the opposite side, the fibre amplifier is spliced to a 3 dB coupler: an output is directed to the micro-mirror while the other one goes to the detection system. The laser cavity is formed between the grating and the deformable micro-mirror (87% measured reflectivity at 1064 nm). At

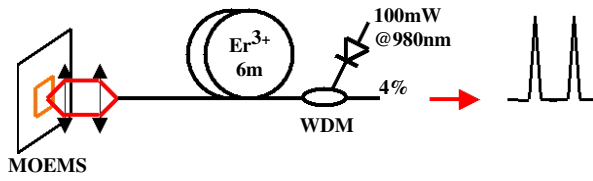


**Figure 5.** Overlap traces of the micro-mirror waveform actuation signal and of the output laser emission modulation for (a) bi-stable (ramp) actuation (28 kHz, 27 V) and (b) slope-type actuation (57 kHz, 23 V).

the other coupler output, the laser emission could be tuned according to the grating position (here  $\lambda = 1528$  nm).

Experimentally, the output fibre from the laser is placed close to the micro-mirror and slightly tilted with respect to the normal incidence to facilitate greater reflectivity discrimination between the off- and on-states of the mirror. The micro-mirror was actuated with bi-stable (ramp) voltage waveform at frequencies between 600 Hz and 140 kHz. Figure 5(a) shows the laser emission pulse train obtained with a  $180 \times 80 \mu\text{m}^2$ -area mirror actuated at 28 kHz with voltage amplitudes of 27 V. The full width at half maximum (FWHM) of the laser pulse is 20  $\mu\text{s}$ . A similar actuation with a triangular-type waveform at 57 kHz and an amplitude voltage of 23 V allows us to obtain pulses of less than 10  $\mu\text{s}$  (FWHM) (figure 5(b)).

Depending of the modulation frequency of the MOEMS, the peak power of one laser pulse is only 25–50% higher than that of the continuous laser emission. Moreover, the pulses are always superposed over a laser continuous emission. This can be explained by the extremely high-gain of the laser fibre for which a single pass of the pumping light is enough for lasing corroborated with the relative difficulty in aligning the end of the fibre laser to the mirror in a way that allows us to obtain the greatest reflectivity discrimination during the



**Figure 6.** Set-up of the laser fibre system using an imaging scheme for aligning the laser beam onto the optical MEMS element.

mirror actuation. In order to resolve the alignment problems, the set-up was modified by introducing an imaging system based on two confocal lenses between one of the fibre ends (angle cleaved) and the optical MEMS element, as presented in figure 6. The other end of the fibre is right-angle cleaved and used as an output mirror. The EDFA is side pumped by a laser diode (100 mW,  $\lambda = 980$  nm) through a WDM.

In such configuration, the laser can be exploited to perform *Q*-switching. We were able to produce high-power train pulses with a repetition rate that can be continuously tuned from 20 to 120 kHz and which depends directly on the actuation frequency of the micro-mirror. For  $80 \times 140 \mu\text{m}^2$  area membranes the FWHM of the pulses runs from 320 ns for lower actuation frequencies (around 30 kHz) up to  $1 \mu\text{s}$  for higher frequencies (120 kHz). Figure 7 presents a typical pulse train for two different actuation frequencies. The average output power of the laser system is around 30 mW, which demonstrates that pulses with peak power of several watts can be achieved. For actuation frequencies below 20 kHz, the modulation is too slow to obtain an efficient *Q*-switching process: the laser produces multiple pulses corresponding to mechanical relaxation oscillations of the mirror [9].

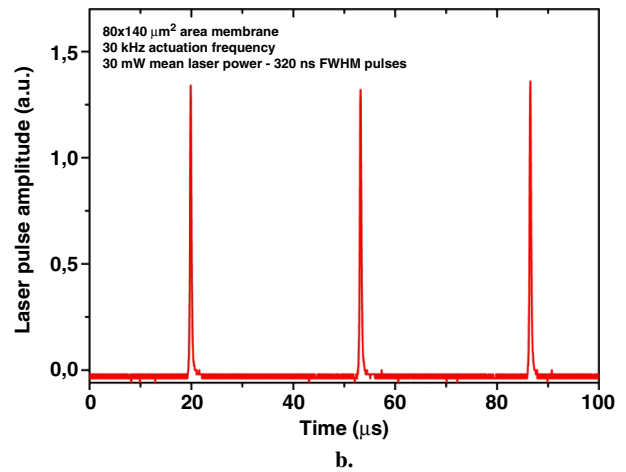
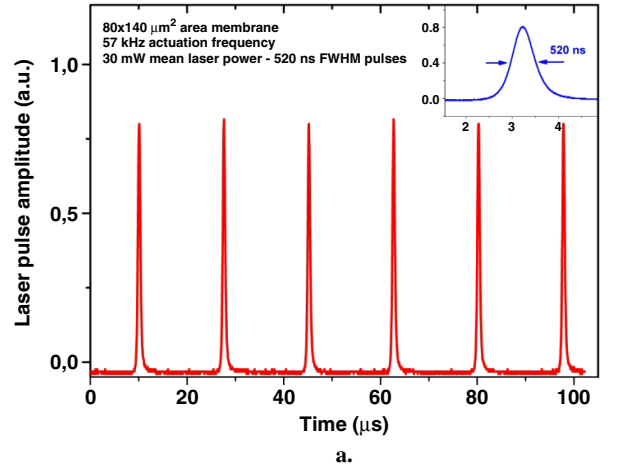
The wavelength spectrum of the pulsed laser emission (figure 8) shows a maximum of intensity at  $\sim 1530$  nm, which corresponds well to the  $\text{Er}^{3+}$  gain band pass.

We are currently designing and implementing similar types of optical switching elements that are faster and present higher reflectivity discrimination states during actuation. Shortening of the switching time of the membranes/mirrors will lead to narrower laser pulses with higher peak powers as well as higher pulse repetition rates. The high reflectivity discrimination states will avoid the use of the additional imaging system and will lead to a smaller, more compact system.

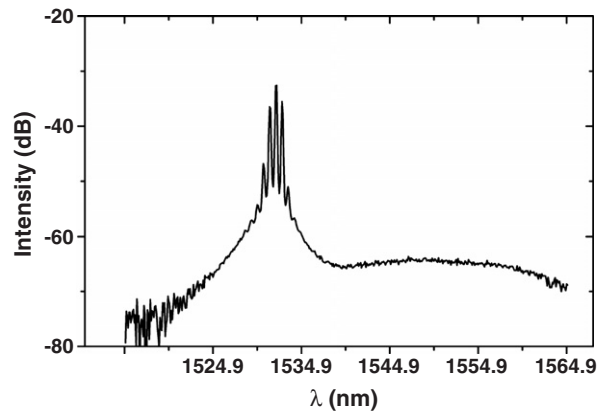
The simplicity of this *Q*-switch generation technique makes it suitable for implementation in more complex set-ups including solid-state micro-lasers, multi-wavelength fibre lasers or different families of fibre lasers (Yb- or Er-Yb-doped) actuated independently or synchronous for wavelength mixing/tuning applications. The combination of this active *Q*-switch system with a passive nonlinear technique should permit us to provide shorter pulses with higher peak power.

#### 4. Conclusions

In summary, we reported a simple, suitable technique to produce active *Q*-switching in a fibre laser system. Our contribution represents a first approach for developing miniature, high-power lasers integrated with deformable micro-mirrors.



**Figure 7.** High power pulse train generation using an optical MEMS element for different actuating frequencies: 57 kHz (a) and 30 kHz (b).



**Figure 8.** Wavelength spectrum of the *Q*-switched EDFA laser emission.

The switching element is based on an electrostatic-actuated micro-mirror that is coupled with a fibre laser. The optical element presents very good mechanical, electrical and optical performances (high reflectivity, achromatic, polarization insensitive) and is fabricated using a low-cost, batch, and simple,

standard fabrication process. The repetition rate of the active *Q*-switching system can be tuned between 20 and 120 kHz. Using a pump power of 100 mW, pulses of several watts peak power can be obtained, with a pulse width as low as 320 ns. The switch can be integrated with various types of laser amplifiers running at different wavelengths. Optimization of the laser *Q*-switching using such micro-mirrors will enable immediate development of applications like laser wavelength mixing or multi-laser emission synchronization.

## References

- [1] Neukermans A and Ramaswami R 2001 *IEEE Commun. Mag.* **39** 62669
- [2] Zhang X M, Liu A Q, Tang D Y and Lu C 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 329
- [3] Peter Y-A, Herzig H P, Rochat E, Dändliker R, Marxer C and de Rooij N F 1999 *Opt. Eng.* **38** 636
- [4] Barnes W 1993 *Q-switched fiber lasers Rare Earth Doped Fiber Lasers and Amplifiers* ed M Dignonnet (New York: Dekker) p 375
- [5] Zalvidea D, Russo N A, Duchowicz R, Delgado-Pinar M, Dýez A, Cruz J L and Andres M V 2005 *Opt. Commun.* **244** 315
- [6] El-Sherif A F and King T A 2003 *Opt. Commun.* **218** 337
- [7] Russo N A, Duchowicz R, Mora J, Cruz J L and Andrés M V 2002 *Opt. Commun.* **210** 361
- [8] Berland E, Blondy P, Tristant P, Catherinot A, Champeaux C and Cros D 2003 Dielectric materials in MEMS switches: a comparison between BST and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> *Proc. 4th Workshop on MEMS for Millimeterwave Communications (Toulouse, France)*
- [9] Jaecklin V P, Linder C, de Rooij N F, Moret J-M and Vuilleumier R 1994 *Sensors Actuators A* **41/42** 324

### 1.2.3 DECLENCHEMENT ACTIF D'UNE CAVITE LASER PAR INTEGRATION DES COMPOSANTS MOEMS DE TYPE CANTILEVER [21, 22, 23]

Comme mentionné auparavant, l'utilisation d'un micro-miroir type cantilever comme miroir de fond de cavité et modulateur laser dans un système à laser fibré permettra, potentiellement, une plus forte discrimination de la réflectivité des membranes ainsi qu'une plus forte tenue au flux laser et donc une amélioration de la fiabilité des composants.

Dans un premier temps, nous avons étudié un premier système laser à fibre dopée Yt (Figure 1.15.a) intégrant un « cantilever » de forme rectangulaire de dimensions  $50 \times 100 \mu\text{m}^2$  (Figure 1.15.b). Dans la configuration montrée sur la Figure 1.15, une diode laser émettant à la longueur d'onde de 975 nm est associée à un multiplexeur 980/1030 nm et pompe un tronçon de 15 cm de fibre dopée Yb. Le pompage cœur se fait à travers un réseau de Bragg fibré de coefficient de réflexion 15% à 1030 nm. Cette longueur d'onde est adaptée à la faible longueur de la fibre amplificatrice. La cavité est refermée à l'autre extrémité sur le composant MOEMS. De ce côté, la face de sortie de la fibre dopée est clivée avec un fort angle ( $>15^\circ$ ) afin de limiter au maximum les réflexions parasites et est imagée sur le cantilever en utilisant un système d'imagerie afocal composé de deux lentilles de distances focales 4,5 mm et 8 mm, choisies afin d'augmenter le diamètre du faisceau sur le miroir. Ceci permet de réduire la densité de puissance optique subie par la poutre et ainsi de diminuer les éventuels risques de dégradation. De plus, l'augmentation de la surface utile améliore également le taux de discrimination du composant.

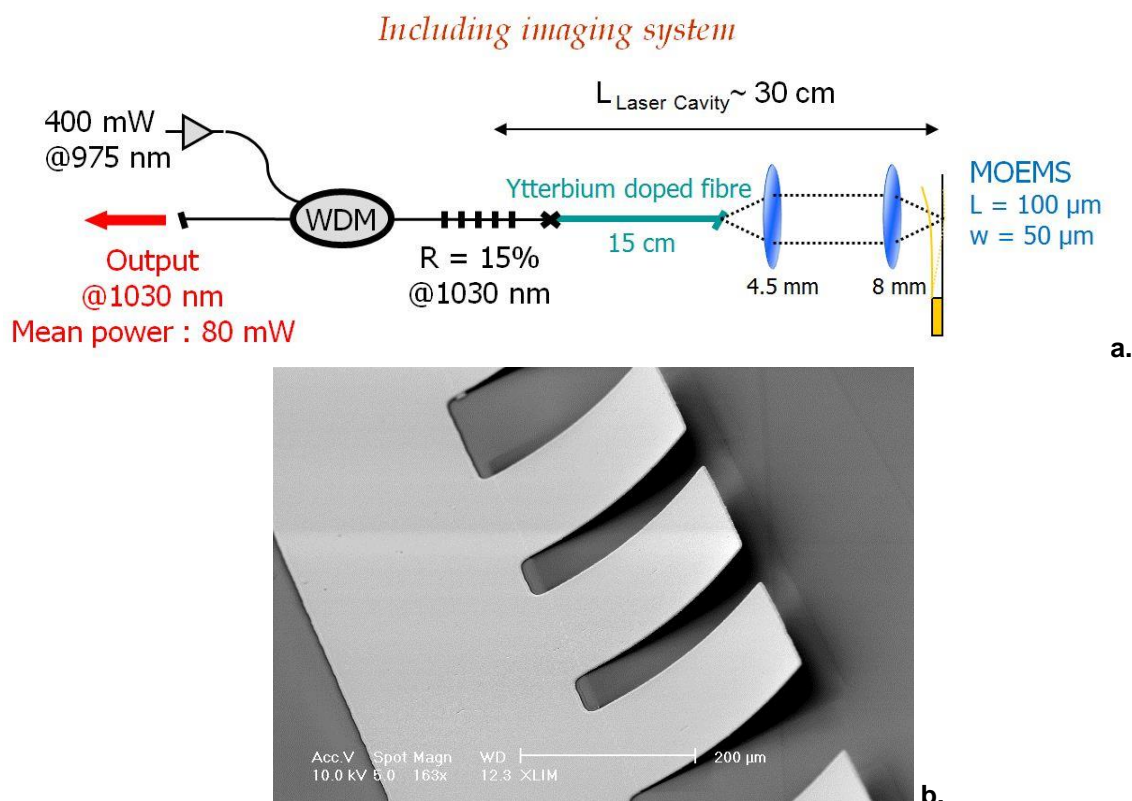


Figure 1.15. a. Dispositif expérimental d'un système laser à fibre intégrant un élément MOEMS type cantilever, en utilisant un système d'imagerie et b. image MEB d'un modulateur typique de forme rectangulaire.

Les résultats obtenus montrent l'apparition des impulsions lasers périodiques avec une fréquence de répétition continûment ajustable sur une large plage, allant de quelques kilohertz à 200 kHz, pour des durées d'impulsions allant de 16 à 30 ns. Sur la Figure 1.16 sont montrés les profils temporels typiques de ces impulsions. La puissance moyenne des impulsions à 200 kHz est d'environ

80 mW, ce qui peut être vu comme relativement faible mais il faut prendre en compte le fait que la courte longueur de fibre dopée ne permet pas d'injecter de fortes puissances de pompe. Un point important à souligner est que ce système laser permet la génération d'impulsions à des fréquences nettement supérieures à la fréquence propre de résonances des cantilevers (quelques dizaines de KHz). Ainsi, il peut engendrer des impulsions à des fréquences de récurrence discrètes de 400 kHz et de 800 kHz correspondant à un fonctionnement des cantilevers sur des harmoniques supérieurs aux fréquences fondamentales de résonance. Cette observation préliminaire nous permettra par la suite de concevoir des systèmes lasers intégrant des composants MOEMS fonctionnant en régime de synchronisation des modes (section 1.4 ci-dessous).

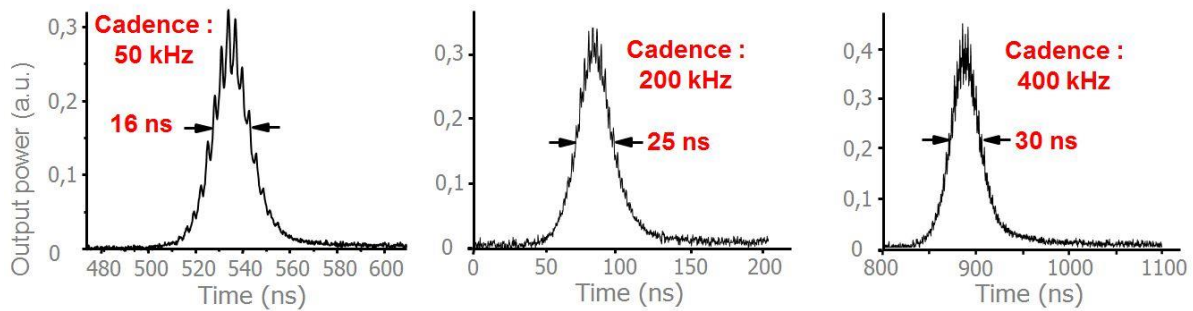


Figure 1.16. Impulsions en sortie de l'amplificateur laser dopé aux ions Yt déclenché par un micro-miroir de type cantilever pour différentes fréquences d'actionnement des micro-miroirs (50, 200 et 400 kHz).

Compte tenu des courtes durées d'impulsions obtenues, la gamme des impulsions laser nanoseconde recherchée pour certaines applications semble donc accessible avec ces dispositifs type cantilever.

Une des solutions pour réduire encore la durée des impulsions lasers est de diminuer la longueur effective de la cavité laser. Cependant, il n'est pas envisageable de raccourcir le tronçon de fibre dopée en dessous des 15 cm sans dégrader très fortement les performances énergétiques du laser. Nous avons donc choisi, pour une nouvelle configuration laser : i) d'éliminer le multiplexeur en longueur d'onde fibré pour ne garder en intra cavité que la fibre dopée et ii) de mettre à profit la forte discrimination imposée par un MOEMS de type cantilever pour tenter de s'affranchir du système d'imagerie entre la fibre et le micro-miroir. Dans cette configuration laser (présentée sur la Figure 1.17), nous avons mis en place un pompage de la fibre dopée par un dispositif d'injection en espace libre qui est hors cavité laser. La cavité laser est refermée à une extrémité par le MOEMS et de l'autre par la face clivée droit (réflexion de Fresnel) de la fibre dopée qui fait office de coupleur de sortie du laser. Aucun système d'imagerie entre la fibre dopée et le micro-miroir n'est intégré à la cavité, nous approchons désormais le micro-miroir à une distance minimale de la fibre, déterminée par la flèche du composant MOEMS utilisé. Cette configuration permet de réduire d'un facteur 2 la longueur de la cavité par rapport à la configuration laser précédente, et, donc de réduire potentiellement du même facteur la durée des impulsions délivrées. Les impulsions les plus courtes que nous avons mesurées dans cette configuration ont une durée d'environ 8 ns (Figure 1.18).

Il faut noter que les micro-miroirs MEMS utilisés dans cette configuration ont des dimensions légèrement inférieures à ceux précédemment utilisés ( $50 \times 75 \mu\text{m}^2$ ) afin de disposer notamment de temps de commutation plus courts. La puissance moyenne mesurée est de 12 mW pour une fréquence de récurrence de 20 kHz, conduisant à une puissance crête de 75 W. Cette puissance moyenne est faible car le système de pompage induit de fortes pertes à la fois sur l'onde signal et l'onde pompe. Toutefois, le dispositif de couplage de la pompe peut être amélioré en disposant d'une optique dichroïque adaptée en remplacement du multiplexeur fibré.



### Without imaging system

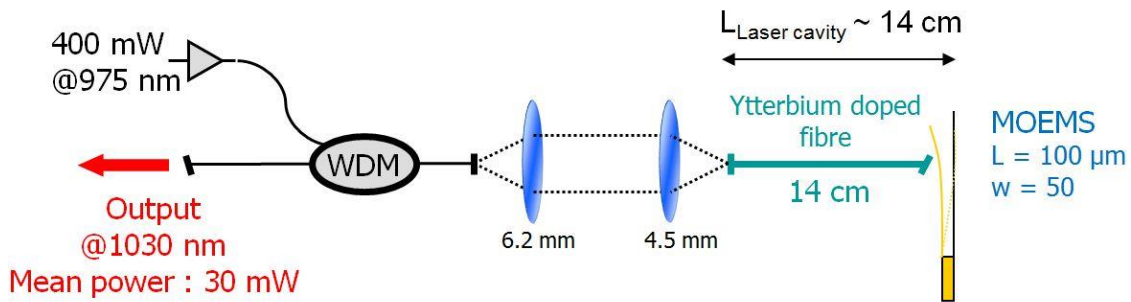


Figure 1.17. Dispositif expérimental d'un système laser à fibre intégrant un élément MOEMS type cantilever, sans l'utilisation d'un système d'imagerie.

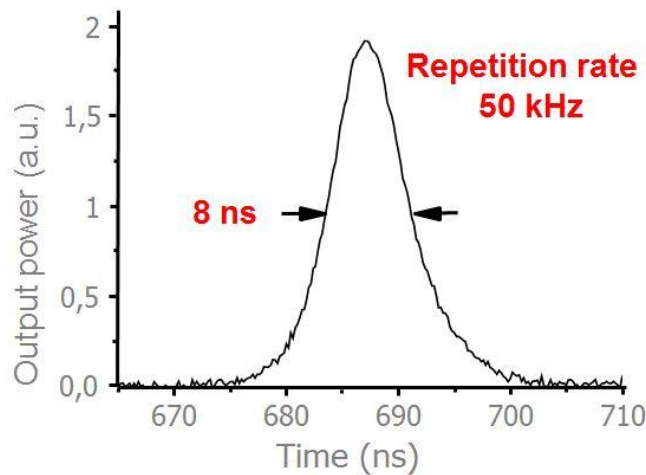


Figure 1.18. Impulsion laser obtenue en utilisant une cavité laser courte, sans système d'imagerie.

Cette dernière configuration laser nous a donc permis d'obtenir des impulsions d'une durée minimale record, **constituant à ce moment l'état de l'art pour une source laser fibrée déclenchée par un modulateur mécanique, notamment de type MOEMS.**

Comme première conclusion intermédiaire, nous avons mis en évidence expérimentalement que les sources lasers à fibre déclenchées par des micro miroirs mobiles (MOEMS) peuvent atteindre des performances en termes de fréquences de récurrence et de durées d'impulsion comparables à celles obtenues avec des modulateurs acousto-optiques mais avec un faible coût de fabrication. La réduction de la longueur de la cavité et les dimensions des composants électromécaniques ont permis d'atteindre des durées d'impulsions pouvant descendre à la dizaine de nanosecondes pour des fréquences de récurrence de l'ordre de 200 kHz. Outre le développement de nouveaux micro-miroirs ayant des fréquences de résonance plus élevées (pour, par exemple, utiliser ces composants en régime de synchronisation de modes), la solution pour améliorer ce type de sources pourrait également venir de MOEMS conçus pour assurer uniquement la fonction de modulateur, c'est-à-dire sans la fonction de réflecteur de fond de cavité, ce qui permettrait de travailler à des niveaux de puissance nettement plus élevés.

# Ytterbium-doped fibre laser Q-switched by a cantilever-type micro-mirror

Marc Fabert\*, Agnès Desfarges-Berthelelot, Vincent Kermène, Aurelian Crunteanu, David Bouyge and Pierre Blondy

XLIM UMR 6172, Université de Limoges/CNRS, 123 av. Albert Thomas, 87060 Limoges, France

\*Corresponding author: [marc.fabert@xlim.fr](mailto:marc.fabert@xlim.fr)

**Abstract:** We present an Ytterbium fibre laser operating in the Q-switch regime by using a Micro- Opto- Electro- Mechanical System (MOEMS) of novel design. The cantilever-type micro-mirror is designed to generate short laser pulses with duration between 20 ns and 100 ns at repetition rates ranging from a few kilohertz up to 800 kHz. The bent profile of this new type of MOEMS ensures a high modulation rate of the laser cavity losses while keeping a high actuating frequency.

© 2008 Optical Society of America

**OCIS codes:** (060.3510) Lasers, fibre; (140.0140) Lasers and laser optics; (140.3540) Lasers, Q-switched; (230.4110) Modulators.

## References and links

1. M. Laroche, A. M. Chardon, J. Nilsson, D. P. Shepherd and W. A. Clarkson, "Compact diode-pumped passively Q-switched tunable Er–Yb double-clad fiber laser," *Opt. Lett.* **27**, 1980-1982 (2002).
2. I. P. Alcock, A. C. Tropper, A. I. Ferguson and D. C. Hanna, "Q-switched operation of a neodymium-doped monomode fibre laser," *Electron. Lett.* **272**, 84-85 (1985).
3. A. F. El-Sherif and A. K. Terence, "High-energy, high-brightness Q-switched Tm<sup>3+</sup>-doped fiber laser using an electro-optic modulator," *Opt. Commun.* **218**, 337-344 (2003).
4. D. D. Zalvidea, N.A. Russo, R. Duchowicz, M. Delgado-Pinar, A. Diez, J. L. Cruz and M. V. Andrés, "High-repetition rate acoustic-induced Q-switched all-fiber laser," *Opt. Commun.* **244**, 315-319 (2005).
5. T. V. Andersen, P. Pérez-Millan, S. R. Keiding, S. Agger, R. Duchowicz, and M. V. Andrés, "All-fiber actively Q-switched Yb-doped laser," *Opt. Commun.* **260**, 251–256 (2006).
6. F. Pardo, R. A. Cirelli, E. J. Ferry, W. Y.-C. Lai, F. P. Klemens, J. F. Miner, C. S. Pai, J. E. Bower, W. M. Mansfield, A. Kornblit, T. W. Sorsch, J. A. Taylor, M. R. Baker, R. Fullowan, M. E. Simon, V. A. Aksyuk, R. Ryf, H. Dyson and S. Arney, "Flexible fabrication of large pixel count piston-tip-tilt mirror arrays for fast spatial light modulators," *Microelectron. Eng.* **84**, 1157–1161 (2007).
7. W. Shin, B.-A. Yu, Y. L. Lee, T. J. Yu, T. J. Eom, Y.-C. Noh, J. Lee and D.-K. Ko, "Tunable Q-switched erbium-doped fiber laser based on digital micro-mirror array," *Opt. Express*, **14**, 5357-5364 (2006).
8. Y.-A. Peter, H. P. Herzig, E. Rochat, R. Dändliker, C. Marxer and N. F. de Rooij, "Pulsed fiber laser using micro-electro-mechanical mirrors," *Opt. Eng.* **38**, 636-640 (1999).
9. D. Bouyge, A. Crunteanu, D. Sabourdy, P. Blondy, V. Couderc, J. Lhermite, L. Grossard and A. Barthélémy, "Integration of micro-electro-mechanical deformable mirrors in doped fiber amplifiers," *Microsystems Technologies* **13**, 1607-1613 (2006).
10. Y. Joeng, Y. Kim, A. Liem, K. Moerl, S. Hoefer, A. Tuennermann and K. Oh, "Q-switching of Yb<sup>3+</sup>-doped fiber laser using a novel micro-optical waveguide on micro-actuating platform light modulator," *Opt. Express* **13**, 10302-10309 (2005).
11. C. J. Gaeta, M. J. F. Digonnet and H. J. Shaw, "Pulse Characteristics of Q-Switched Fiber Lasers," *J. Lightwave Technol.*, **LT-5**, 1645-1651 (1987).
12. A. Crunteanu, D. Bouyge, D. Sabourdy, P. Blondy, V. Couderc, L. Grossard, P. H. Pioger and A. Barthélémy, "Deformable micro-electro-mechanical mirror integration in a fibre laser Q-switch system," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **8**, S347–S351 (2006).
13. P. Blondy, D. Bouyge, A. Crunteanu and A. Pothier, "A wide Tuning Range MEMS Switched Patch Antenna," *IEEE MTT-S, San Francisco, USA*, June 11-16, 2006.
14. G. M. Rebeiz, "Mechanics of Beam and Diaphragm Structures," in *RF MEMS*, (John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2003).

## 1. Introduction

Lasers operating in the Q-Switch regime generate giant pulses by switching the Q factor of the cavity either with an active or a passive modulator. Numerous Q-switching techniques are utilized nowadays showing different advantages and drawbacks. If passive processing like saturable absorption leads to the emission of short laser pulses about nanosecond [1], the repetition rate is not controlled and only varies with the pumping level of the laser medium. On the contrary, the active Q-switched lasers deliver pulses with fixed repetition rate but their duration and recurrence depend on the modulator specificities. The bulky mechanical choppers [2] are not adapted to compact fibre laser systems and restricted to low repetition rates due to their low switching time (about 100 ms). Although they have a short switching time ( $<10$  ns), the electro-optic elements are driven by high voltages [3] and the time needed to store the energy limits the modulation frequency. The acousto-optics modulators are widely used to Q-switch fibre lasers because of their interesting switching time and modulation frequency, but they have high insertion losses [4]. Recently, an all-fibre active Q-switching has been achieved by using a magnetostrictive element to stretch and relax a fibre Bragg grating. The shortest pulses of about 180 ns were obtained at 80 kHz [5].

The optical MEMS devices are a new and elegant solution to the problems mentioned above [6,7]. As the gap between both electrodes of such a MOEMS device continuously grows from 1  $\mu\text{m}$  to some tens of microns, they only need a few tens of volts to be actuated. Furthermore, their metallic surface ensures the achromaticity of these components. Optics can also take advantage of their low cost, batch fabrication and compactness since they can perform a dual function of modulator and end-cavity mirror. Moreover, their actuation frequency can be continuously adjustable and, due to their small dimensions, the laser system has a good integration potential. As a result, some laser sources integrating such devices have been already developed. The first micro-mirrors used to Q-switch fibre lasers were realized under the form of a tip-tilt actuated rigid plate with a maximum light deviation angle of  $2.6^\circ$  [8], leading to a poor discrimination between the on and off commutation states. Long pulse duration around 2  $\mu\text{s}$  for repetition rates between 1 kHz and 30 kHz have been achieved. More recently, an erbium/ytterbium co-doped fibre associated with a bridge-type micro-mirror generated shorter pulses with duration between 300 ns and 800 ns, at higher frequencies from 30 kHz up to 200 kHz [9]. In this case, the MOEMS is made of a fine 500-nm thick gold membrane, anchored on two opposite sides, suspended at 2.2  $\mu\text{m}$  above a bottom actuation electrode covered with a dielectric layer (200-nm thick) for isolation during actuation. Although the size of the membrane may be as large as a few hundred micrometers square, the useful area of such a MOEMS is located on a very small part (some micrometers square) of the membrane close to the anchorage, where the angular discrimination between both actuating states is maximal. Such components require an imaging system to focus the intracavity beam onto the MOEMS, decreasing the interest of its small size.

Other configurations of light modulation based on MEMS technology have been investigated. For example, Y. Joeng et al. obtained repetition rates in the range of 20 kHz (for 2  $\mu\text{s}$  pulses) by creating an axial stress over the waist of a fused biconical taper coupler [10].

Giant-pulse duration is mainly related to the cavity round trip, but also to the switching time of the modulator and to the intracavity loss difference between its both actuating states [11]. The modulation frequency (and thus, the switching time) strongly depends on the dimensions and on the geometrical profile of the MOEMS. The laser repetition rate is limited by the optical pump level and by the switching time of the modulator.

In this paper, we present the results of an ytterbium-doped fibre laser Q-switched by a new type of MOEMS devices. They have very small dimensions and new engineered geometrical profiles (up-warded cantilever-type membranes) which allow them to be faster while keeping a high modulation rate.



## 2. Cantilever-type MOEMS devices

### 2.1. Micro-mirrors description

We previously used bridge-type devices [12] where only a small area of the membrane (near the membrane anchorage) was effectively useful for light redirection. Thus, we developed a new type of devices in order to improve intracavity loss difference between its both actuating states.

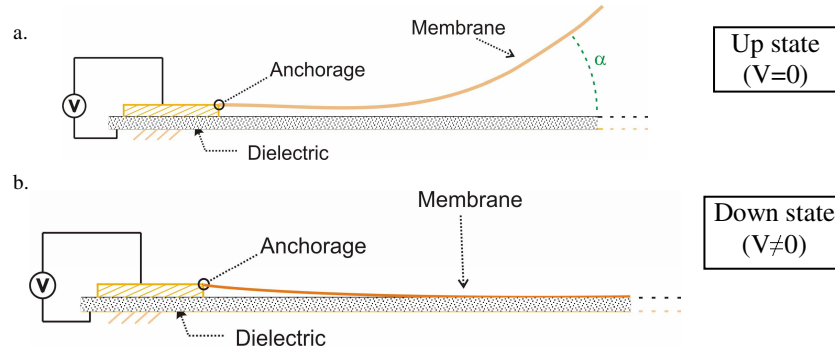


Fig. 1. Design and principle of operation of the cantilever-type micro-mirror.

The new up-curved, cantilever type profile (Figs. 1 and 2) increases considerably the useful area, which could avoid the insertion of an imaging system. Moreover, this may reduce the light power density on the component surface and substantially decrease the possibility of damage.

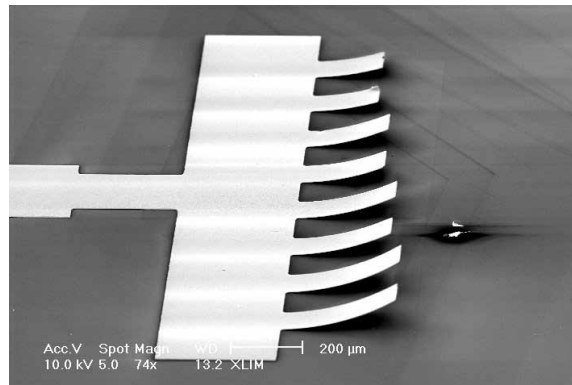


Fig. 2. Scanning Electron Microscope photograph of a MOEMS row of different lengths (200 to 350 microns).

The cantilever-type devices are metallic membranes ( $\sim 1\text{-}\mu\text{m}$  thick) anchored on one side on the substrate (Si, covered by a  $1\text{-}\mu\text{m}$  thick thermally-grown oxide  $\text{SiO}_2$ ). Their up-curved profile is obtained by using a stack of metals (Au/Cr/Au) with dissimilar types of built-in stress (tensile for chromium or compressive for gold). The thicker ( $\sim 900\text{ nm}$ ) lower gold layer with an almost zero build-in stress is used as the structural material of the membrane. The highly tensile stressed Cr layer provides the final curvature of the device and the upper thin Au layer ( $\sim 100\text{-nm}$  thick) ensures a high reflectivity at the laser wavelength of about 80%. The thickness of the Cr layer (from 10 to 15 nm) stacked between the two gold coatings allows a precise, controlled, up-deflection of the membrane. The fabrication process is similar with that presented in [13]. The dimensions of the fabricated micro-mirrors are between  $50\times 50\text{ }\mu\text{m}^2$  and  $150\times 350\text{ }\mu\text{m}^2$ . Their mechanical resonant pulsation (which can be

approximated in a first time as the fundamental pulsation of the membrane) is related to their dimensions with the following expression (Eq. (1)):

$$f = 1.019 \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [14] \quad (1)$$

where  $h$  and  $L$  are the thickness and the length of the membrane respectively,  $E$  the Young's modulus of the material and  $\rho$  is the volume density. It has to be noted that  $f$  is independent of the membrane width. Typically, a cantilever-type MOEMS of 1.5- $\mu\text{m}$  thick and 125- $\mu\text{m}$  long has a mechanical resonant frequency of 260 kHz.

The deflection angle ( $\alpha$  on Fig. 1.) of an incident beam normal to the substrate varies from 9 degrees to 15 degrees for length between 150 to 300  $\mu\text{m}$ . This angle is deduced of interferometric measurements (Fig. 3).

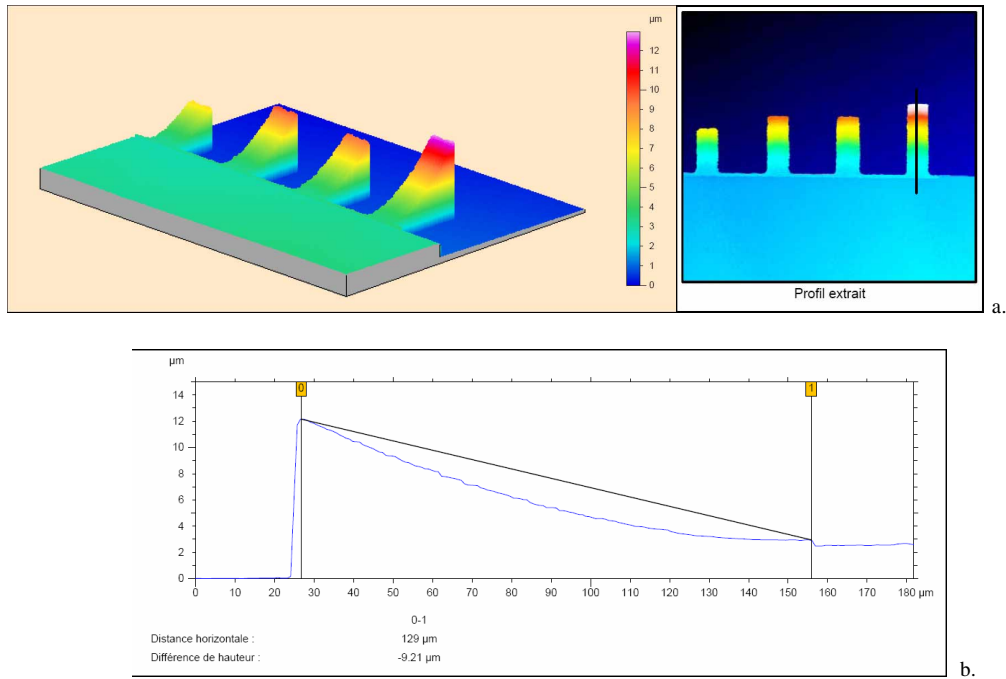


Fig. 3. (a). Surface reconstruction of 4 cantilever-type micro-mirrors from interferometric measurements. 3(b) Corresponding geometrical profile of the longest MOEMS (125- $\mu\text{m}$  long).

When applying a typical actuation voltage of 20 to 40 V between the Si substrate (lower electrode) and the metallic membrane (upper electrode), the induced electrostatic force attracts the membrane down to the substrate (Fig. 1(a)). The electrical isolation is provided by the  $\text{SiO}_2$  layer which prevents shorting of the electrical actuation circuit. The membrane recovers its initial position when removing the actuation voltage (Fig 1(b)). The fabricated components are easily controllable from 1 Hz to about 200 kHz. As mentioned above, this maximum actuation frequency is limited by the primary mechanical resonant frequency of the cantilever which mainly depends on its length and stiffness. These components have been actuated for more than one billion cycles.

## 2.2. Optical characterization

We analysed the dynamical behaviour in reflectivity of the cantilever-type MOEMS using the setup shown in Fig. 4. A probe beam at 1550 nm was launched in a 50/50 fibre coupler (1). At

one output port (3), the beam was imaged on the micro-mirror thanks to the optical system that will be used in the final fibre laser architecture. We measured the temporal evolution of the reflected beam power at the second input port of the coupler (2).

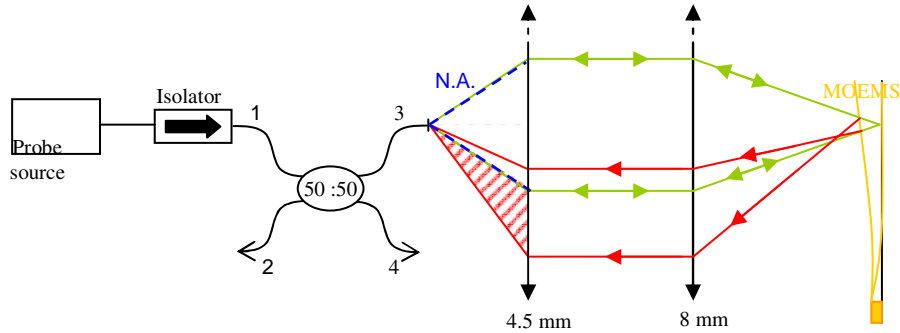


Fig. 4. Experimental setup for the observation of reflectivity variations; 2: measure of reflectivity; 4: power level control. The green rays define the beam propagation before and after reflection on the MOEMS for the on-state case ( $V=0$ ), i.e. when the beam is correctly redirected towards the laser cavity. The red rays represent the deflected beam for the off-state ( $V=0$ ). The hatched area shows the light losses, imposed by the deflection. N.A.: Numerical Aperture.

The probe beam diameter on the micro-mirror was  $8\text{ }\mu\text{m}$ , when the mobile membrane of the mirror was  $100\text{-}\mu\text{m}$  long and  $50\text{-}\mu\text{m}$  large. The optical transmission of this system (fibre, imaging system and MOEMS) was studied at different positions of the probe beam along the MOEMS, according to the applied command voltage.

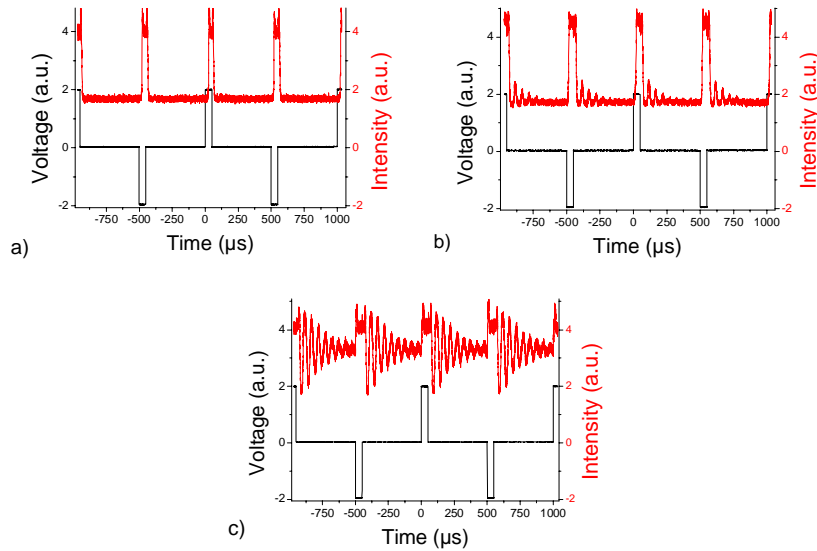


Fig. 5. Applied voltage (in black) and reflected optical signal (in red) showing the mechanical oscillations of a  $100\text{-}\mu\text{m}$ -long cantilever for three different positions of the incident focused beam along the micro-mirror length: a) close to the mobile extremity of the cantilever, b) at the middle of the membrane length, c) close to the anchorage.

On Fig. 5 we observe the profiles of the bipolar actuation voltage applied to the MOEMS (in black) and the reflected optical signal (in red) at three different positions of the incident focused beam along the micro-mirror length. These graphs show that the reflectivity of the system previously described is highly modified by the actuation of the MOEMS. When a voltage is applied (negative or positive), the mobile membrane of the mirror stands close to the substrate (down state) and the reflected power increases because the MOEMS acts as a standard mirror utilized at normal incidence, reflecting the beam in the numerical aperture of the fibre (green rays in Fig. 4). When the voltage returns to zero, the membrane comes back to its initial up-state; the small angle of the micro-mirror with the substrate redirects the incident beam out of the fibre numerical aperture (red rays in Fig. 4). In that case, the measured reflecting power decreases followed by some modulations due to the dumping oscillations of the membrane around its resting position. As shown on Fig. 5(a), these oscillations are not optically perceptible by the system of characterization when the probe beam is focused at the mobile extremity of the MOEMS: the membrane achieves its maximal angle with the substrate ( $\alpha$ ) and the reflecting beam (deflected with an angle of  $2\alpha$ ) cannot be launched into the numerical aperture of the fibre (e.g. 0.14 for a standard single mode fibre) whatever the oscillation amplitude around the resting position. In the following section, the MOEMS will be illuminated only on its mobile extremity to avoid any optically sensitive parasitic oscillations.

### 3. Experimental results

The fibre laser experimental setup including the cantilever type MOEMS is depicted Fig. 7.

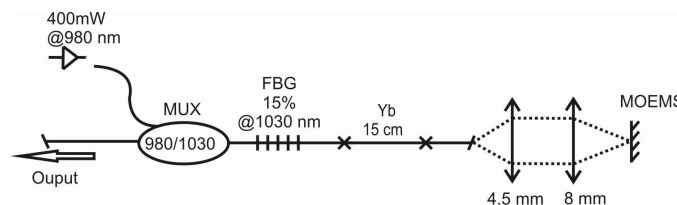


Fig. 7. The experimental design of the fibre laser system including the optical MOEMS device.

The laser system consists of a 15-cm long ytterbium doped fibre (with a high rare-earth concentration of 15600 ppm weight, Liekki Yb1288-4/125), core-pumped by a 980 nm wavelength diode (400 mW maximum power) through a multiplexer (MUX) and a Fibre Bragg Grating (FBG) with a reflectivity of 15% at 1030 nm, which is the natural lasing wavelength of this short doped fibre. The maximum launched pump power is about 300 mW. Because of the short fibre length, the absorbed pump power is only of 170 mW. The laser cavity is closed on one side by the FBG and on the other side by the micro-mirror. A couple of lenses (4.5 mm and 8 mm focal lengths) images the angle-cleaved end of the doped fibre on the MOEMS. The laser beam diameter is 8  $\mu$ m on the micro-mirror.

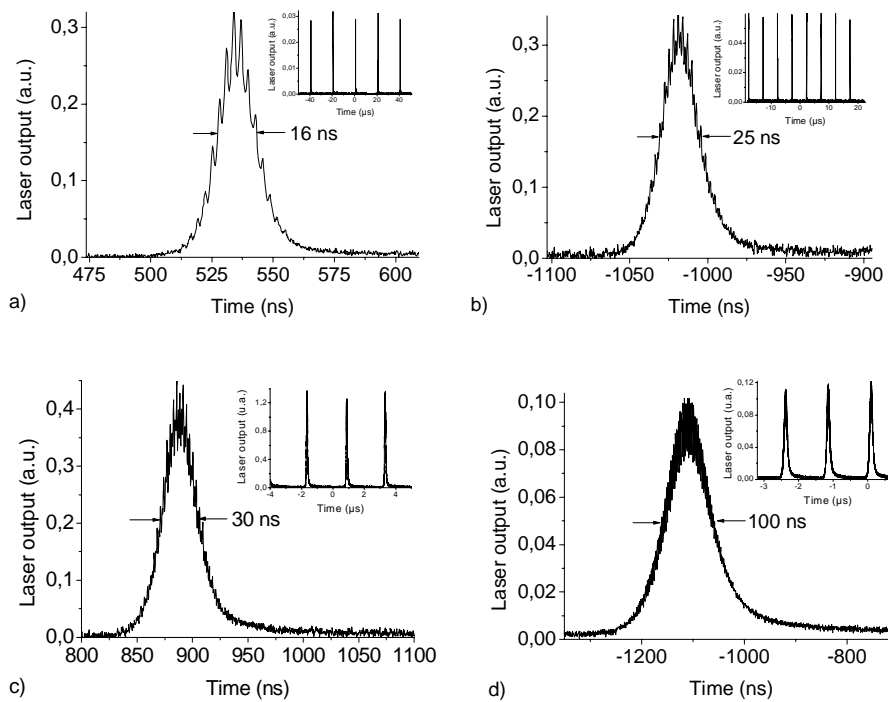


Fig. 8. Laser pulses shape at different micro-mirror actuation frequencies: a) 50 kHz and b) 200 kHz; c) 400 kHz and d) 800 kHz.

When electrically actuated, the micro-mirror switches the quality factor of the cavity generating short pulses of about 20 ns for repetition rates up to 200 kHz (Figs. 8(a) and 8(b)) with an average output power of about 80 mW. This output power is low, mainly because of the short length of the doped fibre. This is also due to the losses in the free space part of the cavity (Fresnel reflections on the optical components and partial reflection on the MOEMS). The obtained laser pulses are, to the best of our knowledge, at least 20 times shorter than any other results reported so far for fibre laser systems using optical MEMS devices. As observed in Fig. 8, the laser pulse shape is modulated with a period of 3 ns corresponding to one cavity round trip time (the laser cavity is about 31 cm long). Although the primary mechanical resonant frequency of the cantilevers is close to 200 kHz, we succeeded to obtain Q-switched laser pulses at even much higher frequencies. Indeed, the laser system can generate a pulse train at different repetition rates, continuously from some kilohertz up to 200 kHz, but it can also be operated at 400 kHz and 800 kHz which are harmonic frequencies of the primary mechanical resonant frequency of the micro-mirror. We obtained pulses of 30 ns and 100 ns durations at 400 kHz and 800 kHz respectively (Fig. 8(c) and 8(d)).

We also Q-switched the laser without using the imaging system by bringing the MOEMS as close as possible to the fibre end. We observed similar performances in terms of pulse duration and repetition rate except for the average optical power which was 10% lower. This power decrease is due to the small size (4  $\mu\text{m}$ ) of the fibre mode and its corresponding small Rayleigh length (12  $\mu\text{m}$ ) compared to the distance between the MOEMS and the fibre end (50  $\mu\text{m}$ ); the large size of the beam back from the micro-mirror cannot match perfectly the fibre mode, leading to higher insertion loss.

#### 4. Conclusion

We developed a cantilever-type micro-mirror in order to generate short Q-switch pulses in a fibre laser configuration. Due to the high modulation rate provided by the micro-mirrors and to the short cavity, the laser emission consists in very short pulses with duration of about 20 ns at repetition rates up to 200 kHz. Longer pulses up to 100 ns were also obtained at higher harmonic frequencies as high as 800 kHz. To our knowledge, these results are the best reported so far for a fibre laser actively Q-switched by using a deformable micro-mirror. Further modifications of the MOEMS will, most certainly, shorten the pulse duration and increase the average output power. For example, a change of the structural material of the membrane will decrease the switching time of the MOEMS. Moreover, a larger guided mode chosen, so that its Rayleigh length is greater than the distance between the fibre end and the MOEMS, will avoid the use of the imaging system. It will reduce the insertion losses of the free space part of the setup while shortening the laser cavity.

# 8 ns pulses from a compact fibre laser Q-switched by MOEMS

Marc Fabert, Aurelian Crunteanu, Vincent Kermène, Agnès Desfarges-Berthelemy, David Bouyge and Pierre Blondy

*Xlim, CNRS UMR 6172, 123 avenue Albert Thomas, 87060 Limoges cedex  
marc.fabert@xlim.fr*

**Abstract:** We report on active Q-switching of Ytterbium-doped fibre laser using a new type of deformable micro-mirror. This cantilever-type micro-mirror increases the modulation rate of the laser cavity losses while keeping a high actuating frequency. Hence, we obtained shorter pulses than 10 ns for frequencies up to 50 kHz. The maximum frequency we reached was of 800 kHz with a pulse duration of 100 ns.

© 2009 Optical Society of America

**OCIS codes:** (060.3510) Lasers, fibre; (140.3540) Lasers, Q-switched; (230.4685) Optical microelectromechanical devices.

## 1. Introduction

Due to their achromaticity and their integration capability, deformable micro-mirrors based on MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) technology appeared as good components to Q-switch fibre sources. These kinds of device have already demonstrated their efficiency to Q-switch actively fibre lasers even if the pulses produced were rather long [1,2]. As an example, an erbium/ytterbium co-doped fibre laser was developed to produce pulses between 300 ns and 800 ns at repetition rates from 30 kHz to 200 kHz [3].

The pulse duration in Q-switch regime, is mainly related to the photon life time in the cavity when the repetition rate is essentially fixed by the pumping level. If the characteristics of the amplifying medium and of the resonator influence on the temporal performances of a Q-switch fibre laser, they are also dependant on the modulator characteristics when the laser is actively Q-switched. Until now, the electro mechanical systems used to Q-switch fibre lasers were previously designed for other applications like Digital Light Processing (DLP) [1] or RF MEMS variable capacitors [3]. As a consequence, the change of function of these micro-components used as laser modulators ties down the laser performances. For instance, one of the main drawbacks of the reference 1 is due to the slowness of the micro-mirror tilt, generating a long pulse (2  $\mu$ s) at low frequency rate (60 kHz). Thus, we have designed a new MOEMS geometry suited to the modulation of fibre laser Q factor. The bent profile of this new kind of MOEMS ensures a high modulation rate of the laser cavity losses while keeping high frequency actuating.

## 2. MOEMS

The new up-curved cantilever-type profile (Fig. 1) provides the high intracavity loss difference between both actuating states. The large useful area (some thousands micrometer square) avoid the use of an imaging system leading to a compact actively Q-switched fibre laser.

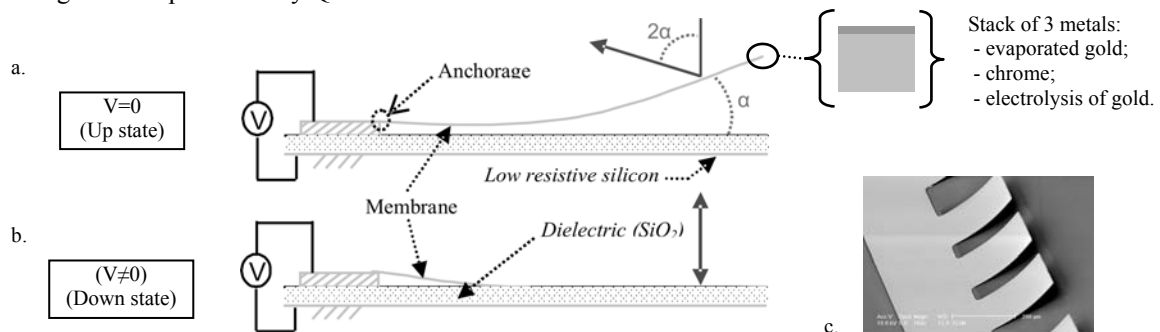


Fig.1. Design and principle of operation of the cantilever-type micro-mirror (a, b); Electron Microscope photography of 3 250- $\mu$ m long MOEMS (c).

The cantilever-type devices are metallic membranes ( $\sim 1\text{-}\mu\text{m}$  thick) anchored on one side on the substrate (Si, covered by a  $1\text{-}\mu\text{m}$  thick thermally-grown oxide  $\text{SiO}_2$ ). A stack of metals (Au/Cr/Au) with dissimilar types of built-in stress (tensile for chromium or compressive for gold) ensures their up-curved profile. The structural material of the membrane is the thicker ( $\sim 900\text{ nm}$ ) lower gold layer. The final curvature of the device is provided by the highly tensile stressed Cr layer, the upper thin Au layer ( $\sim 100\text{-nm}$  thick) ensuring a high reflectivity. The thickness of the Cr layer (from 10 to 15 nm) stacked between the two gold coatings allows a



precise, controlled, up-deflection of the membrane. The fabricated micro-mirrors have dimensions in the range of  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$  to  $150 \times 350 \mu\text{m}^2$ . The angle of deflection ( $2\alpha$  on Fig. 1) at the end of the membrane varies from 15 degrees to 30 degrees for length between 150 to 300  $\mu\text{m}$ .

When applying a typical actuation voltage of 20 to 40 V, the electrostatic force attracts the membrane down to the substrate (Fig. 1b). By removing the actuation voltage, the membrane recovers its initial position (Fig. 1a). The fabricated components are easily controllable from 1 Hz to about 200 kHz. As mentioned above, the primary mechanical resonant frequency of the cantilever (which mainly depends on its length and stiffness) limits this maximum actuation frequency.

### 3. Q-switched fibre laser

The experimental setup consists in a short ytterbium-doped fibre as the gain medium. The laser cavity is closed on one side by the micro-mirror and on the other side by the reflection of 4% induced by the right-cleaved end of the doped fibre (Fig.2).

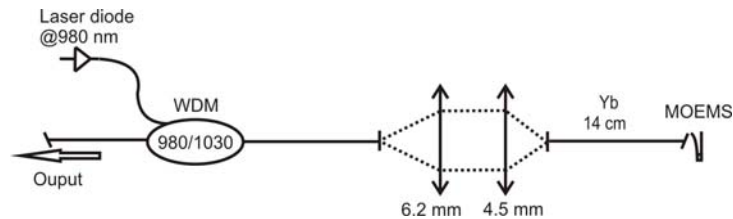


Fig.2. The experimental setup of the fibre laser system.

The 14-cm long ytterbium-doped fibre is pumped through a wavelength division multiplexer (WDM) and a couple of lenses chosen to adapt mode size between both fibres. The absorbed pump power is of 170 mW. The MOEMS is in front of the fibre output without any imaging system. This fibre laser source is able to generate pulses of duration shorter than 10 ns up to 50 kHz (Fig.3).

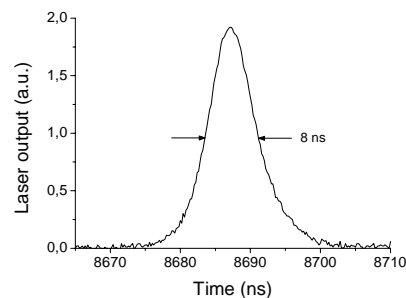


Fig.3. Laser pulse profile at 50 kHz.

To our knowledge, this is the shortest pulses obtained with a fibre laser Q-switched by a MOEMS. Due to the very short length of the doped fibre, the mean power of this source is quite low. For example in the case of Fig.3, the mean power was 30 mW. The pulse repetition rate can be continuously adjusted up to 200 kHz. Also we found Q-switching opportunities at higher frequencies, 400 kHz and 800 kHz, which correspond to harmonics of the mechanical resonant frequency of the cantilever.

### 4. Conclusion

We obtained fibre laser pulses of durations shorter than 10 ns, which are the shortest pulses achieved in a fibre laser system Q-switched by deformable micro-mirror. The new up-curved MOEMS ensures a high modulation rate of the Q factor, reducing considerably the laser pulse duration. Moreover, this is the first time that Q-switching at frequencies up to 800 kHz with such components has been obtained. Further modifications of the MOEMS (size, shape, constituents) and of the fibre laser (fibre output mode) will, most certainly, shorten the pulse duration and increase the average output power.

### 5. References

- [1] Y.-A. Peter, H. P. Herzig, E. Rochat, R. Dändliker, C. Marxer and N. F. de Rooij, "Pulsed fiber laser using micro-electro-mechanical mirrors," *Opt. Eng.*, **38**, 636-640 (1999).
- [2] W. Shin, B.-A. Yu, Y. L. Lee, T. J. Yu, T. J. Eom, Y.-C. Noh, J. Lee and D.-K. Ko, "Tunable Q-switched erbium-doped fiber laser based on digital micro-mirror array," *Opt. Express* **14**, 5357-5364 (2006).
- [3] M. Fabert, A. Desfarges-Berthelemy, V. Kermène, A. Crunteanu, D. Bouyge and P. Blondy, "Ytterbium-doped fibre laser Q-switched by a cantilever-type micro-mirror," accepted for publication in *Optics Express*.

### 1.3 SYSTEMES LASER A FIBRE MULTILONGUEUR D'ONDE A DECLENCHEMENT ELECTROMECHANIQUE

**D**e part leur compacité et leur faible coût, les dispositifs utilisant les technologies MEMS sont utilisés couramment dans des systèmes destinés à des applications biomédicales (systèmes micro-fluidiques, laboratoires sur puce etc.).

Nous montrons dans la suite de ce manuscrit que les systèmes lasers à fibre intégrant des composants MEMS optiques (MOEMS) que nous avons développés, peuvent être mise à contribution dans ce vaste champ de recherche et être utilisés comme outils de diagnostic biomédicaux. En effet, certaines techniques de diagnostic cellulaire nécessitent par exemple la réalisation de sources lasers émettant plusieurs longueurs d'onde dans les domaines de l'UV et du visible avec des densités spectrales de puissance élevées ( $>100\mu\text{W/nm}$ ).

La technique la plus couramment utilisée dans le domaine du diagnostic et tri cellulaire est basée sur la **cytométrie en flux**. Cette technique permet de faire défiler, à grande vitesse (1 à 10m/s), des particules, molécules ou cellules dans le rayonnement d'un faisceau laser. Après absorption d'une partie de l'énergie émise par la source, la cellule (ou une partie d'elle-même) réémet par fluorescence un signal lumineux à une autre longueur d'onde. L'analyse de ce rayonnement permet alors de classer les cellules par type et de détecter par exemple la présence d'un système infectieux modifiant le comportement cellulaire. Cette analyse par fluorescence est généralement réalisée grâce à l'introduction de marqueurs fluorescents (fluorochromes) fixés sur chacun des différents composés que l'on souhaite détecter. A chaque marqueur correspond une longueur d'onde d'excitation et donc potentiellement une source laser monochromatique associée. La multiplication de ces marqueurs est limitée par le recouvrement spectral de leur émission. Même si cet effet parasite peut être compensé par l'ajout de paramètres de compensation, cela limite fortement la précision du diagnostic réalisé. De plus, la multiplication du nombre de fluorochromes introduit une complexité importante au niveau du système d'excitation qui est composé de plusieurs sources lasers monochromatiques indépendantes.

Une des techniques envisagées depuis peu est basée sur des lasers à lumière blanche ou des supercontinua, qui offre des solutions innovantes avec une accordabilité en longueur d'onde importante et couvrant l'ensemble du spectre visible. Néanmoins, les densités de puissance par unité de spectre restent généralement faibles et difficilement ajustables.

Nous avons développé une alternative à cette technique, dont le principe de fonctionnement est basé sur l'oscillation synchrone de sources lasers à MOEMS émettant des longueurs d'onde différentes dans le proche infrarouge. L'introduction d'éléments non linéaires (sommation de fréquence) permet par la suite d'obtenir des raies spectrales dans le domaine visible dont la longueur d'onde est ajustable. Nous démontrons ci-dessous la faisabilité d'un tel système avec **la réalisation d'une source laser compacte bi-longueur d'onde couplée à un micro-miroir achromatique mécaniquement déformable** sous l'action d'un champ électrostatique.

Dans une autre approche, **nous avons proposé un dispositif de caractérisation des objets microscopiques (molécules, cellules etc.)** qui permet d'augmenter le nombre de marqueurs dans l'analyse cytométrique tout en préservant une bonne précision sur l'analyse réalisée. Ce procédé innovant, basé sur le couplage d'une source laser blanche pouvant être découpée spectralement en utilisant des composants MOEMS, possède un **coût réduit et un encombrement plus avantageux que ceux utilisés actuellement**.

#### 1.3.1 LASER IMPULSIONNEL A FIBRES BI-LONGUEUR D'ONDE [24]

**L**e système laser bi-longueur d'onde impulsif à fibre consiste en l'association dans la même cavité laser de deux milieux amplificateurs, l'un dopé aux ions Erbium et l'autre dopé aux ions Ytterbium. Le déclenchement de l'oscillation laser aux deux longueurs d'onde est réalisé en utilisant un composant MOEMS unique (en configuration « pont ») avec un coefficient de réflexion quasi identique aux longueurs d'onde d'émission laser des deux milieux amplificateurs (1  $\mu\text{m}$  et à 1.5

$\mu\text{m}$ ). Les fibres amplificatrices sont pompées directement dans le cœur à travers des multiplexeurs en longueur d'onde (WDM 980/1550 nm et 980/1060 nm), par deux diodes lasers identiques émettant une puissance maximale de 100 mW, à la longueur d'onde 980 nm (Figure 1.19).

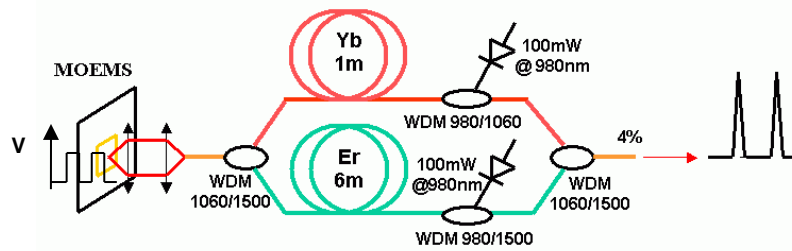
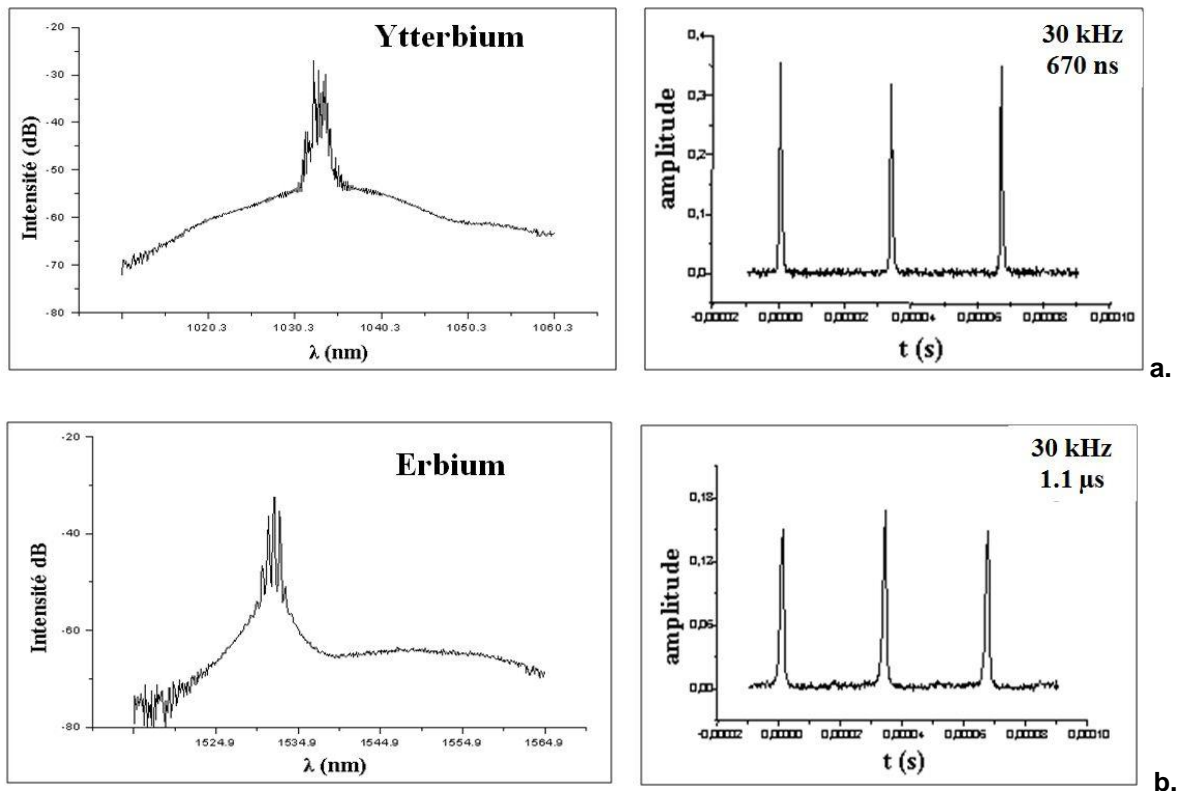


Figure 1.19. Configuration du système laser impulsionnel bi-longueur d'onde à 1  $\mu\text{m}$  et 1.5  $\mu\text{m}$ .

Comme observé sur la Figure 1.19, les signaux en sortie des fibres amplificatrices sont mélangés dans un WDM (1060/1550). Le réflecteur de sortie, obtenu en clivant droit l'extrémité de la fibre du WDM, a une réflectivité de 4%. Le micro-miroir en or, achromatique, et mécaniquement déformable sous l'action d'un champ électrostatique est utilisé comme miroir de fond de cavité commun aux deux lasers et comme modulateur optique pour générer des impulsions aux deux longueurs d'onde différentes. Un couple de lentilles convergentes est introduit pour imager la face de sortie de la fibre amplificatrice sur le composant et optimiser la réinjection du faisceau laser dans la fibre.



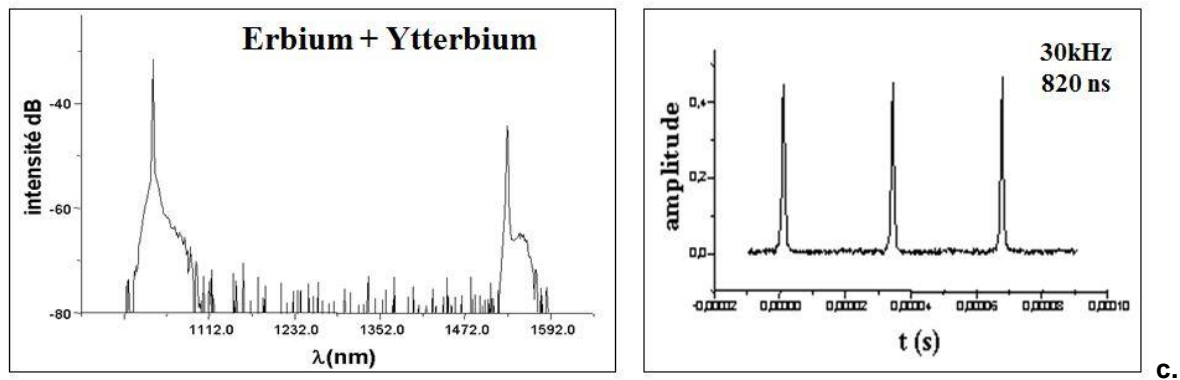


Figure 1.20. Spectres d'émission (partie gauche) et trains d'impulsions (partie droite) générés par le système laser bi-longueur d'onde lors du fonctionnement en « mode » : a) Yb, b) Er et c) Er + Yb.

La Figure 1.20 présente, à gauche, les spectres d'émission spectrale du système laser global et sur la partie droite, les trains d'impulsions typiques générés par le système laser dans plusieurs cas : a) fonctionnement du système seulement avec le milieu amplificateur Yb (la partie Er étant « passive » sans injection du signal de pompe) b) fonctionnement du système seulement avec le milieu amplificateur Er (la partie Yb étant « passive ») et c) le résultat de la superposition parfaite des trains d'impulsions issus de chacun des amplificateurs lasers (pompage des deux milieux amplificateurs). Les impulsions émises lors du fonctionnement bi-longueur d'onde (dont la durée n'a pas été optimisée) ont des durées de 820 ns à une fréquence de répétition de 30 kHz. Le spectre d'émission du faisceau de sortie (Figure 1.20.c partie gauche) montre deux pics d'émission autour de 1060 nm et de 1550 nm, correspondant respectivement aux bandes d'émission des fibres dopées Yb et Er. Ainsi, dans cette configuration, le système laser génère des trains d'impulsions parfaitement synchronisés, de fréquence de récurrence ajustable entre 20 et 200 kHz, déterminée par la fréquence d'actionnement du composant MOEMS.

La possibilité d'utiliser, pour système laser présenté sur la Figure 1.19, un composant MOEMS pour chaque bras constituant le système global est également intéressant. Ainsi, chaque milieu amplificateur pourra être commandé (à travers l'actionnement de son micro-miroir) de manière synchrone ou asynchrone (Figure 1.21) et pourra, dans le cadre d'un fonctionnement asynchrone, générer des spectres d'émission à des longueurs d'onde différentes décalées temporellement par la simple commande électrique des composants MOEMS.

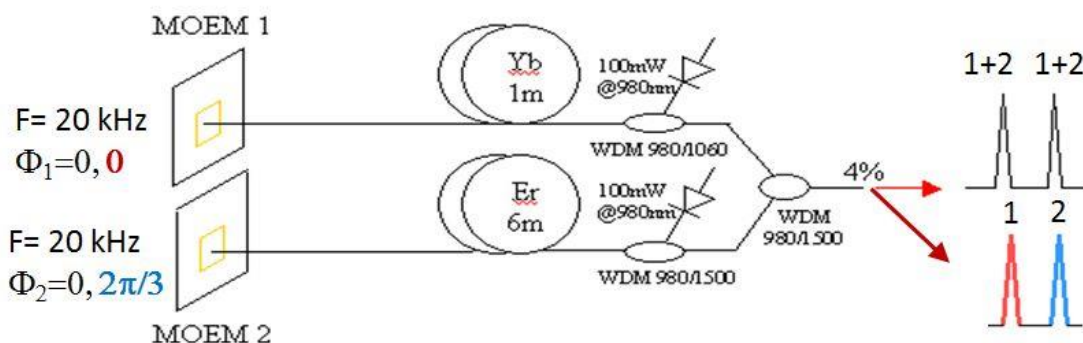


Figure 1.21. Architecture d'un système laser bi-longueur d'onde permettant l'émission synchrone ou asynchrone (décalage temporel) des deux longueurs d'ondes (ici à 1  $\mu$ m et 1.5  $\mu$ m).

Ce principe de fonctionnement (multiplexage temporel et spectral de plusieurs sources lasers actionnées par des composants MOEMS propres à chaque source) pourra trouver des applications intéressantes dans des expériences de spectroscopie type pompe-sonde. Il sera par la suite

développé et présenté dans la partie 1.6 pour la réalisation de sources lasers pour un fonctionnement à haute cadence ou à sommation de puissance.

### 1.3.2 SOMMATION DE FREQUENCE DANS UN CRISTAL PPLN

Suite à la réalisation de ce système laser bi-longueur d'onde compact, nous avons modifié son architecture en sortie, comme indiqué sur la Figure 1.22, pour générer des faisceaux infra-rouges (IR) avec des polarisations linéaires et des puissances moyennes plus élevées. Pour réaliser une accordabilité en longueur d'onde du système laser global, la sortie du WDM de la fibre dopée  $\text{Er}^{3+}$  est soudée à un coupleur 50/50 et le faisceau d'une des deux sorties est focalisé par une lentille ( $f = 11 \text{ mm}$ ) sur un réseau de diffraction (pas de 830 traits/mm avec une efficacité de diffraction de 90% pour une polarisation parallèle à son axe et de 30% pour une polarisation qui lui est perpendiculaire). En conséquence, le réseau de diffraction joue le rôle de polariseur et le faisceau réinjecté a une polarisation linéaire. La longueur d'onde d'émission du tronçon laser à fibre dopée  $\text{Er}^{3+}$  est ajustable sur une plage spectrale de 60 nm allant de 1520 à 1580 nm, correspondant à la totalité de la largeur de la bande de gain de la fibre dopée  $\text{Er}^{3+}$ . L'amplificateur à fibre dopée Yb a la même architecture. Le faisceau émis présente une polarisation linéaire et une longueur d'onde ajustable sur la totalité de la bande de gain de la fibre dopée Yb: de 1040 à 1080 nm.

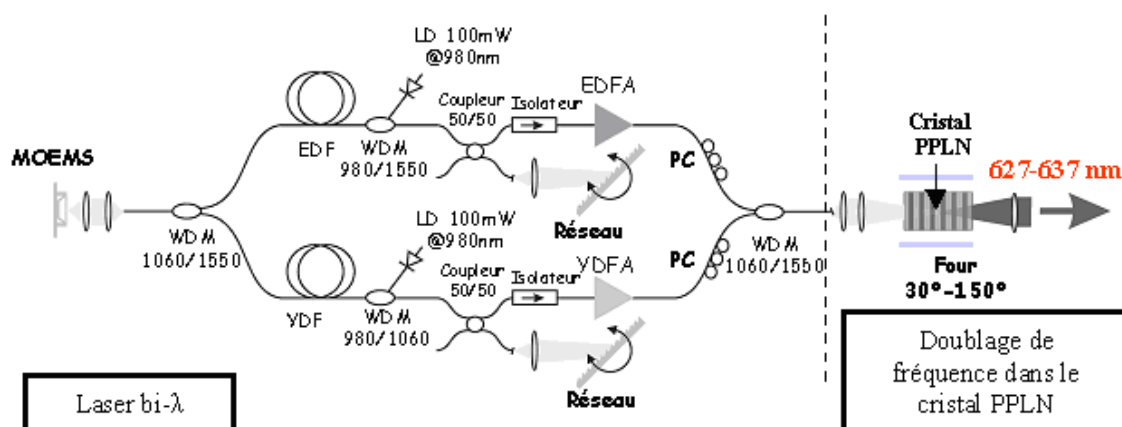
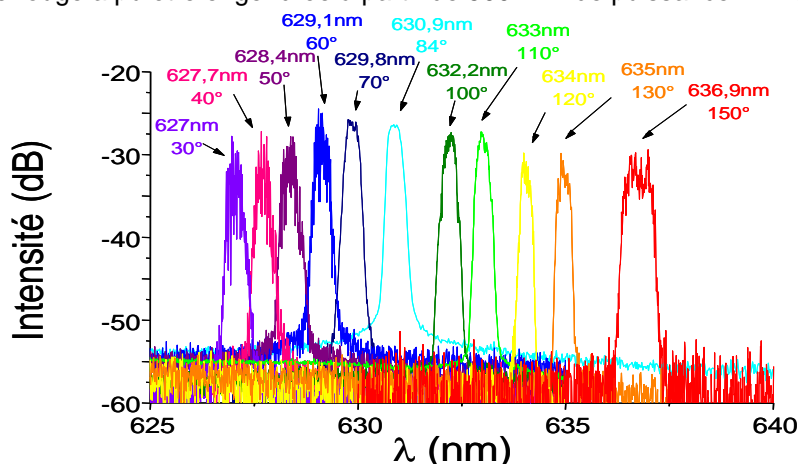


Figure 1.22. Architecture du laser bi-longueur d'ondes ajustable et sommation de fréquence dans un cristal non-linéaire (PPLN).

Pour chaque laser (tronçon Er ou Yt), la deuxième fibre de sortie du coupleur 50/50 est soudée à un isolateur qui injecte le faisceau dans deux amplificateurs optiques de puissance. Les deux amplificateurs sont utilisés pour équilibrer les puissances moyennes se propageant sur les deux bras du système laser avant de les mélanger dans un WDM 1060/1550. On note que des contrôleurs de polarisation (PC sur la Figure 1.22) sont placés avant le multiplexeur pour ajuster les directions d'oscillations des champs et pour assurer une conversion de fréquence efficace dans le cristal non-linéaire de niobate de lithium à inversion périodique (PPLN). Dans cette configuration, le système laser global bi-longueur d'onde génère des trains d'impulsions parfaitement synchronisés à 1  $\mu\text{m}$  et à 1.5  $\mu\text{m}$ , avec une puissance laser moyenne de 500 mW et à une fréquence de récurrence de 28 kHz. La durée des impulsions est de 1.9  $\mu\text{s}$ . Au-delà de l'action de la membrane permettant le déclenchement synchrone des deux cavités couplées, l'utilisation de réseaux de diffraction situés dans les cavités et des amplificateurs optiques placés à l'extérieur permettent d'obtenir un rayonnement accordable autour des deux radiations principales (1520-1580 nm et 1040-1080 nm) tout en maintenant un niveau d'énergie élevé.

La synchronisation des radiations émises par les sources présentées sur la Figure 1.22 permet alors de réaliser une conversion de fréquence efficace dans un cristal de niobate de lithium à inversion périodique des domaines ferroélectriques (pas d'inversion : 14.1  $\mu\text{m}$ ) conçu pour la sommation de fréquence entre 1064 nm et 1550 nm. Le faisceau de sortie bi-couleur, polarisé linéairement, est

focalisé par une lentille ( $f = 100$  mm) dans le cristal de 1 cm de long. L'utilisation d'un four permet le contrôle des conditions d'accord de phase pour obtenir une conversion de fréquence efficace mais permet également une accordabilité de la fréquence somme grâce au décalage des raies d'oscillation centrales de chaque source. Le signal ainsi converti est observé par l'intermédiaire d'un analyseur de spectre optique. Une variation de température comprise entre 25 à 150 °C nous a permis de générer un faisceau laser de longueur d'onde ajustable de 627 à 637 nm (Figure 1.23). Ainsi, 1.5 mW de puissance dans le rouge a pu être engendrée à partir de 500 mW de puissance IR incidente.



**Figure 1.23.** Spectre d'émission visible en sortie du cristal PPLN pour différentes températures

Nous avons montré ici la possibilité d'utiliser des composants MOEMS comme miroirs lasers achromatiques déformables permettant la synchronisation de deux impulsions à différentes longueurs d'onde grâce à une architecture laser particulière. Un train d'impulsions à une longueur d'onde visible et accordable sur une dizaine de nanomètres a été obtenu grâce à une conversion fréquentielle dans un cristal non linéaire massif. Notons également que l'utilisation de cristaux à pas multiples intégrant des guides canaux permettrait d'une part d'augmenter l'efficacité de conversion et de multiplier les mélanges fréquentiels vers d'autres longueurs d'onde ( $1550\text{nm}+630\text{nm} \rightarrow 447$  et  $1060\text{nm}+630\text{nm} \rightarrow 395\text{nm}$ ).



# Synchronized Tunable $Q$ -Switched Fiber Lasers Using Deformable Achromatic Microelectromechanical Mirror

D. Bouyge, A. Crunteanu, V. Couderc, D. Sabourdy, and P. Blondy

**Abstract**—We report the synchronization of actively  $Q$ -switched erbium- and ytterbium-doped fiber lasers by means of a single electrostatically actuated deformable metallic micromirror. Synchronized and tunable pulse trains were generated at 1.064 and 1.55  $\mu\text{m}$  with a pulse duration and repetition rate of  $\sim 1.5 \mu\text{s}$  and 32 kHz, respectively. The output dual wavelength beam is then converted in a nonlinear crystal designed for sum frequency generation. Tunable output red radiation close to 630 nm is obtained.

**Index Terms**—Frequency conversion, microoptoelectromechanical system (MOEMS), multiwavelength  $Q$ -switched fiber lasers, tunable radiation.

## I. INTRODUCTION

**M**ULTIWAVELENGTH laser sources producing tunable radiations in the visible or the near infrared (IR) region are nowadays particularly investigated. This type of source is a key element for wide-spread applications in fields like biomedicine, remote sensing, or display. Multiwavelength emission in visible and the near infrared region can be obtained by using spectral spreading of short pulses in optical fiber. This concept needs a pulsed laser source with sufficient peak power to reach nonlinear effect thresholds. Nevertheless, in most cases a low spectral power density is obtained because of the limited energy carried by the input pump pulse [1].

Until now, laser emissions covering the wavelength range between 800 and 1560 nm were reported by using thulium, neodymium, ytterbium, and erbium-doped fiber lasers. The laser emission at wavelengths in the visible domain can be obtained by means of nonlinear conversion of the near infrared radiations [3]–[5]. The most used technique is based on second-harmonic generation (SHG), but the sum frequency generation (SFG) can also be used [2], [3]. Using this technique, simultaneous emission of two rare earth ions coming from a unique cavity was already reported in [5] by using two separate gain media. Additionally, the generation of laser radiation in the red wavelength region of the spectrum was obtained by using the SFG of two infrared waves emitted from the same gain medium [6]. It was observed that the gain competition between the two radiations was a key point to obtain stable emission.

Usually, the pulsed laser regime is required for reaching an efficient nonlinear wavelength conversion. For obtaining intracavity losses modulation passive or active modulators can be

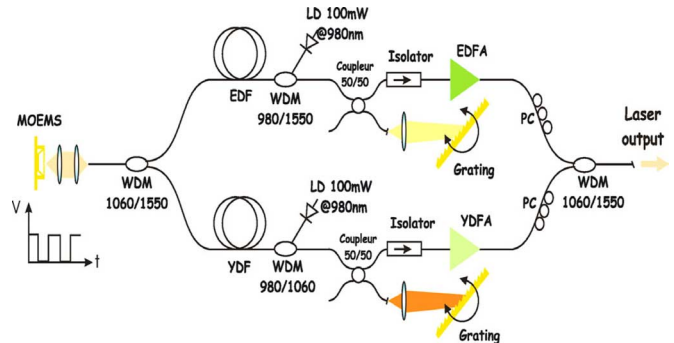


Fig. 1. Setup of the dual-wavelength tunable pulsed-laser system.

used. Conventional solutions for  $Q$ -switch operation are based on active devices such as acoustooptic modulators, electrooptics solutions, piezoelectric Bragg gratings systems, or microoptoelectromechanical system (MOEMS) [7], [8]. In the case of a dual wavelength system the chromatic characteristic of the modulator is a fundamental point. Two different modulator elements can be used to modulate each signal but an active synchronization is needed between the elements.

The use of MOEMS is a simple alternative to produce temporal modulation in a laser cavity [7]. The intrinsic properties of such elements (compactness, scalability, low insertion losses, low crosstalk, polarization insensitive, achromaticity, low cost) are very interesting for their integration in compact laser systems such as fiber laser sources.

In this letter, we present a  $Q$ -switched-dual-wavelength fiber laser system based on two erbium and ytterbium sources controlled by a single achromatic MOEMS. We demonstrate the synchronized laser emission from this dual wavelength system at 1550 and 1064 nm with microsecond pulse duration. The repetition rate is controlled by modifying the actuation frequency of the electrostatically actuated MOEMS. The two emitted infrared radiations are then converted in the red wavelengths domain by using the SFG obtained in a periodically poled lithium niobate (PPLN) crystal. The tuneability of the two fundamental IR waves allows obtaining a red radiation emitted between 627 and 637 nm.

## II. DUAL-TUNABLE-WAVELENGTH PULSED FIBER LASER

The tunable dual-wavelength laser system depicted in Fig. 1 consists of two synchronized  $Q$ -switched fiber lasers. The first oscillator is composed by a 6-m-long erbium-doped fiber amplifier (EDFA) core pumped through a wavelength-division multiplexer (WDM) by a laser diode (LD) emitting up to 100 mW at 980 nm. Then, 90% of the pump power is absorbed in the first

Manuscript received February 8, 2008; revised March 21, 2008.

The authors are with XLIM Research Institute, University of Limoges, 87060 Limoges, France (e-mail: vincent.couderc@xlim.fr).

Color versions of some of the figures in this letter are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/LPT.2008.923747

meter of the doped fiber. The right extremity of this amplifier is spliced to a 50/50 coupler. The output beam from one of the two output ports is collimated using a convergent lens having a focal length of 11 mm and directed onto a diffraction grating operating at the Littrow angle. The gold-coated diffraction grating has 1200 gr/mm and a diffraction efficiency close to 90% for the P polarization and only 35% for the S polarization. Therefore, the diffraction grating acts as a polarizer and the radiation emitted by the laser is strongly linearly polarized with an extinction ratio of 50:1. The Er-doped fiber laser is tunable on a spectral range of 60 nm from 1520 to 1580 nm, which matches the whole gain bandwidth of the erbium-doped fiber. The second output port of the 50/50 coupler is spliced to an isolator before amplification.

The second laser is based on an ytterbium-doped fiber amplifier (YDFA) having a quasi-similar architecture, i.e., with similar resonator length, losses, and pump power (100 mW). The emission is also linearly polarized and tunable between 1040 and 1080 nm.

At the left extremities of the two systems, the signals are mixed thanks to a WDM (1060 nm/1550 nm), which allows the spatial superimposition of the two radiations.

A single achromatic MOEMS element placed at the output end of the WDM (1060/1550) acts both as an end mirror and an optical modulator. An imaging system placed between the output WDM and the MOEMS realizes a spatial adaptation of the laser beam. At the output of each laser, an amplification step is used. After amplification, the two signals are mixed by using a second WDM 1060 nm/1550 nm. Polarization controllers (PC) are used in order to obtain a linear polarization for each beam at the output of the system, which is a fundamental point to allow wavelength conversion step.

### III. ELECTROSTATICALLY ACTUATED MIRROR

A single MOEMS micromirror is based on a metallic bridge-type membrane (500-nm-thick thermally evaporated gold) suspended at a height of  $2.2\ \mu\text{m}$  over an actuation electrode covered with a dielectric thin film ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 200-nm thickness). The fabrication is done in a clean room environment and the realization steps are similar to those described in [7]. Fig. 2 shows a scanning electron microscope (SEM) image of a matrix containing 44 identical mirrors with dimensions of  $240 \times 160\ \mu\text{m}^2$ .

As demonstrated earlier in [7], when introduced in a laser cavity and actuated using a bipolar voltage waveform, the MOEMS element behaves like a mirror with variable curvature, modulating the  $Q$ -factor of the laser cavity. Above a certain actuation frequency (higher than  $\sim 20\ \text{kHz}$  for our specific experimental arrangement) the modulation of the quality factor of the laser cavity becomes fast enough for the generation of high-intensity narrow laser pulses. The matrix arrangement is intended to be used in experiments implying multiple laser cavities that can be operated in a synchronous or asynchronous ways.

### IV. RESULTS

By using the above-mentioned MOEMS element we obtained synchronized emission at 1064 and 1550 nm with quasi-equal output power of 20 and 16 mW for the ytterbium and erbium

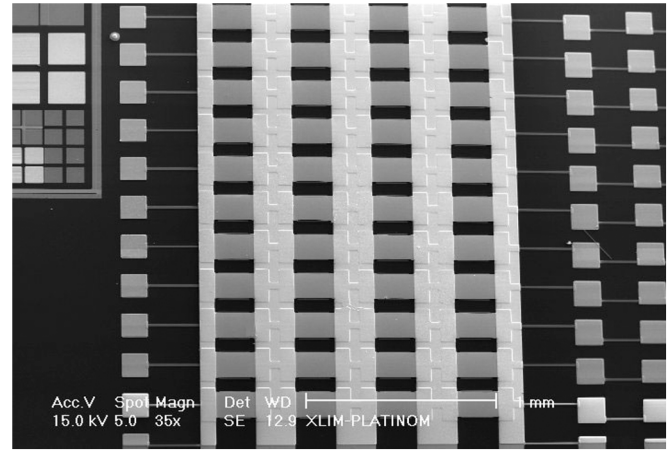


Fig. 2. SEM of a matrix of 44 micromirrors in which every row can be independently actuated.

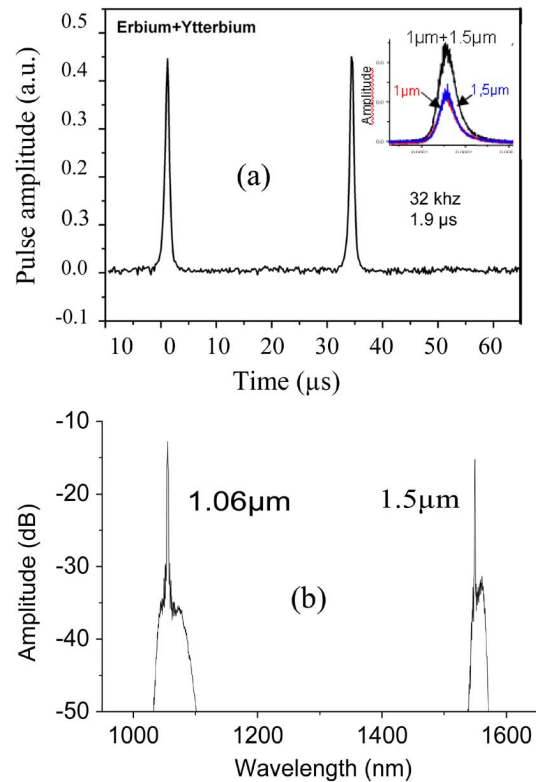


Fig. 3. (a) Synchronized pulse trains. (b) Emitted spectrum observed at the output of the dual-tunable-wavelength fiber laser system.

laser sources, respectively [see Fig. 3(b)]. Pulse trains were generated at two wavelengths with quasi-equal pulses duration [ $\sim 1.9\ \mu\text{s}$ , see insert in Fig. 3(a)]. The repetition rate is electronically set by means of a rectangular input signal applied to the MOEMS element and can be tuned from a few kilohertz and up to 170 kHz. We should note that the obtained pulse duration and peak power increase with this parameter [7]. An example of a pulse train is shown in Fig. 3(a) (repetition rate: 32 kHz). An output average power of 500 mW with balance energy on each radiation (250 mW for each wavelength, 1 W pump power of each amplifier) is measured, which corresponds to pulse energy of  $9\ \mu\text{J}$  at 1064 nm and  $9\ \mu\text{J}$  at 1550 nm.

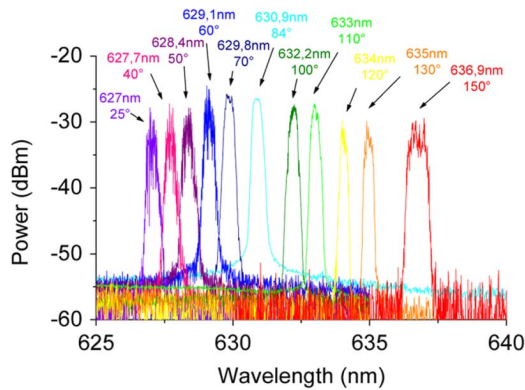


Fig. 4. Experimental data recorded at the PPLN output and illustrating tunable SFG. Maximum output red power: 2.5 mW (pump power: 250 mW@ $\lambda_1$  and 250 mW@ $\lambda_2$ ).

## V. SUM FREQUENCY GENERATION

In a second step, for obtaining visible wavelength we performed the sum frequency generation of the two output waves. Both the 1550 and 1064 nm are linearly polarized and are focused by means of a convergent lens ( $f = 100$  mm) in a 1-cm-long PPLN crystal. This nonlinear element has an inversion periodicity of  $14.1 \mu\text{m}$  for SFG and is placed in an oven for controlling the phase matching between the two fundamental radiations. The temperature can be varied between  $30^\circ\text{C}$  and  $150^\circ\text{C}$  with a stability of better than  $0.5^\circ\text{C}$ .

The fundamental incident beams at the output laser system have a Gaussian shape and radii of  $3.9 \mu\text{m}$  and  $5.8 \mu\text{m}$  at  $1.064 \mu\text{m}$  ( $\lambda_1$ ) and  $1.55 \mu\text{m}$  ( $\lambda_2$ ), respectively. They are inducing waist radii of  $48.8$  and  $72.5 \mu\text{m}$  in the nonlinear crystal for the  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$ , respectively.

In these conditions, the crystal length corresponds approximately to the Raleigh range of the two incident beams. For a given couple of tunable wavelengths, we increased the crystal temperature to reach the phase matching condition. At  $84^\circ\text{C}$ , we obtained a converted power in the red at  $630.9$  nm by using the initial wavelengths centered at  $1064$  and  $1549$  nm.

By using a classical model based on the nonlinear coupled equations, we obtained temperature-dependent phase matching conditions in the nonlinear crystal. For  $\lambda_2$  fixed at  $1549$  nm and  $\lambda_1$  tuned from  $1053$  to  $1081$  nm and a PPLN temperature between  $25^\circ\text{C}$  and  $150^\circ\text{C}$  (maximum temperature available for our experiments), quasi-phase matching (QPM) conditions can be obtained for SFG.

The incident and the converted beams are mixed at the output of the PPLN and collimated using a convergent lens ( $f = 100$  mm). An interferometric shortpass filter is then used to select only the converted signals in the visible region of the spectrum. By varying the temperature of the PPLN crystal and by tuning the wavelengths of the radiation emitted from the dual-laser system, we observed, using an optical spectrum analyzer, a converted signal which can be tuned between  $627$  and  $637$  nm (see Fig. 4). The average power of the visible radiation

is close to  $2.5$  mW. Even though for the present experiments the conditions for an efficient nonlinear conversion are not optimum, the conversion efficiency can be increased by using a longer nonlinear crystal and achromatic optics for coupling the IR radiation into the crystal. Moreover, the decrease of the pulse duration could drastically improve the peak power and then the nonlinear conversion efficiency.

## VI. CONCLUSION

In summary, we report a suitable technique for obtaining synchronized pulse train in a tunable-dual-wavelength Q-switched fiber laser system with a tunable repetition rate. The modulator element for Q-switching operation is based on an electrostatic-actuated micromirror having high reflectivity, achromaticity, and polarization insensitivity.

The tunable dual wavelength beam ( $1064$ – $1550$  nm) is then converted by SFG in a PPLN crystal. A pulsed tunable signal from  $627$  to  $637$  nm has been obtained with microsecond duration. Thanks to its achromatic property, only one MOEMS can be used to switch the two laser sources oscillating at different central wavelengths. This type of source can be an alternative for the visible multicolor pulsed laser generation. Moreover, the uses of PPLN crystal with several inversion periodicities could induce multiple conversions using both SHG and SFG. In this case, different tunable visible radiations linked to conversion of the  $1064$  and  $1550$  nm could be generated [for example:  $532$  nm (SHG  $1064$  nm),  $775$  (SHG  $1550$  nm),  $630.9$  (SFG  $1064$  nm– $1550$  nm),  $396$  nm (SFG  $532$  nm– $1550$  nm), and  $448$  nm (SFG  $775$  nm– $1064$  nm)].

## REFERENCES

- [1] J. K. Ranka, R. S. Windeler, and A. J. Stentz, "Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at  $800$  nm," *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 1, pp. 25–27, 2000.
- [2] Y. Feng, S. Huang, A. Shirakawa, and K.-I. Ueda, "Multiple-color CW visible lasers by frequency sum-mixing in a cascading Raman fiber laser," *Opt. Express*, vol. 12, pp. 1843–1847, May 2004.
- [3] J. L. He, H. Liu, J. Du, F. Xu, H. T. Wang, S. N. Zhu, Y. Y. Zhu, and N. B. Ming, "Simultaneous CW red, yellow, and green light generation traffic signal lights by frequency doubling and sum-frequency mixing in an aperiodically poled  $\text{LiTaO}_3$ ," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, pp. 228–230, Jul. 2003.
- [4] R. P. Mildren, H. M. Pask, H. Ogilvy, and J. A. Piper, "Discretely tunable, all-solid-state laser in the green, yellow, and red," *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 12, pp. 1500–1502, Jun. 2005.
- [5] M. Rusu, R. Herda, and O. G. Okhotnikov, "Passively synchronized erbium ( $1550$  nm) and ytterbium ( $1040$  nm) mode-locked fiber lasers sharing a cavity," *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 19, pp. 2246–2248, Oct. 2004.
- [6] J. Bouillet, L. Lavoute, A. Desfarges Berthelemon, V. Kermène, P. Roy, and V. Couderc, "Tunable red-light source by frequency mixing from dual band Er/Yb co-doped fiber laser," *Opt. Express*, vol. 14, no. 9, pp. 3936–3941, 2006.
- [7] A. Crunteanu, D. Bouyge, D. Sabourdy, P. Blondy, V. Couderc, L. Grossard, P. H. Pioger, and A. Barthélemy, "Deformable micro-electro-mechanical mirror integration in a fiber laser Q-switch system," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, vol. 8, no. 7, pp. S347–S351, Jul. 2006.
- [8] W. Shin, B. A. Yu, Y. L. Lee, T. J. Yu, T. J. Eom, Y. C. Noh, J. Lee, and D. K. Ko, "Tunable Q-switched erbium-doped fiber laser based on digital micro-mirror array," *Opt. Express*, vol. 14, no. 12, pp. 5356–5364, 2006.

### 1.3.3. SYSTEME LASER MULTICOULEUR A CODAGE MULTIPLE POUR LE DIAGNOSTIC CELLULAIRE [25, 26]

Dans le contexte mentionné en début de la section 1.3, *nous avons conçu et réalisé un système de caractérisation des objets microscopiques (molécules, cellules etc.)* basé sur une source laser multi longueur d'onde et un système de codage spectro- temporel intégrant un composant MOEMS, pour des applications en cytométrie en flux.

Sur la Figure 1.24 est montré une vue schématique simplifié du système laser multi- couleur intégrant une source de pompe impulsienne, un système d'élargissement spectral et le mécanisme de découpage et de codage spectral.

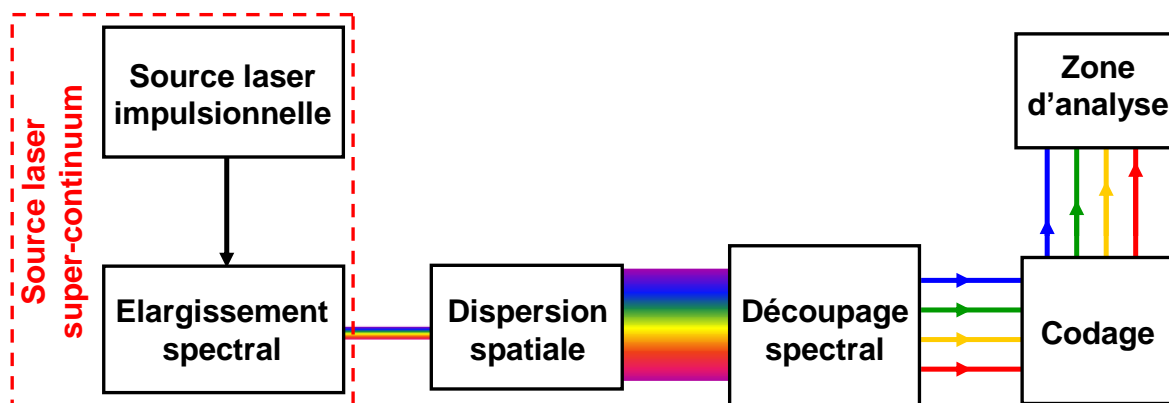


Figure 1.24. Vue schématique du système optique expérimentale de sélection spectrale et de codage de signaux excitateurs dédié à la cytométrie en flux

L'implémentation pratique du concept présenté sur la Figure 1.24 est décrite en détail sur la Figure 1.25. Brièvement, le système de caractérisation (Figure 1.25.a) prévoit de combiner une source de lumière polychromatique avec un assemblage linéaire de commutateurs opto- électro- mécaniques de type MOEMS. Nous utilisons un signal large bande visible (~400 – 750 nm) issu d'une source à lumière blanche (super continuum) qui est étalé spatialement à l'aide d'un système dispersif (un ensemble de prismes) sur une matrice d'éléments MOEMS (Figure 1.25.b). A chaque élément (cantilever) de la matrice correspond une région spectrale spécifique définie par le système dispersif et par le nombre et les dimensions des éléments individuels MOEMS. L'actionnement indépendant de chaque élément électromécanique permet de **sélectionner une ou plusieurs longueurs d'onde et de les utiliser comme signaux sonde dans un espace de mesure de type cellule cytométrique**. De par leur revêtement réfléchissant, ces composants bénéficient d'une forte réflectivité large bande allant de l'ultraviolet à l'infrarouge. En outre, ces modulateurs de type MOEMS, qui offrent une forte diminution des coûts, se distinguent des modulateurs électro- et acousto-optiques par rapport à leur achromaticité, qui est une propriété primordiale dans un tel dispositif optique.

Les composants MOEMS permettent ainsi de découper spatialement et de manière précise le signal large bande en une multitude de raies étroites et de les moduler automatiquement à des fréquences spécifiques. Les radiations sélectionnées présentent des longueurs d'ondes  $\lambda_i$  prédéterminées correspondant aux longueurs d'onde d'excitation des fluorochromes fixés sur les éléments microscopiques à analyser. L'actionnement des éléments est réalisé par un module de commande électronique multipistes et permet d'adresser spatialement, de manière synchrone ou asynchrone, les signaux optiques excitateurs vers des dispositifs de codage ou vers la zone d'analyse d'un cytomètre en flux. Dans le but d'augmenter la complexité du codage, il est possible d'imprimer sur chaque longueur d'onde découpée un codage temporel optique précis grâce à la propagation dans des guides d'ondes de longueur différentes. Chaque radiation  $\lambda_i$  est alors couplée dans une seule fibre de longueur  $L_i$  prédéterminée afin d'introduire un retard temporel unique sur chaque signal excitateur. Ce retard permet d'octroyer à chaque fluorochrome une fenêtre temporelle propre lui



permettant de se désexciter partiellement ou totalement. Ainsi, les fluorochromes sont sollicités successivement de manière à éviter un recouvrement temporel des signaux réémis.

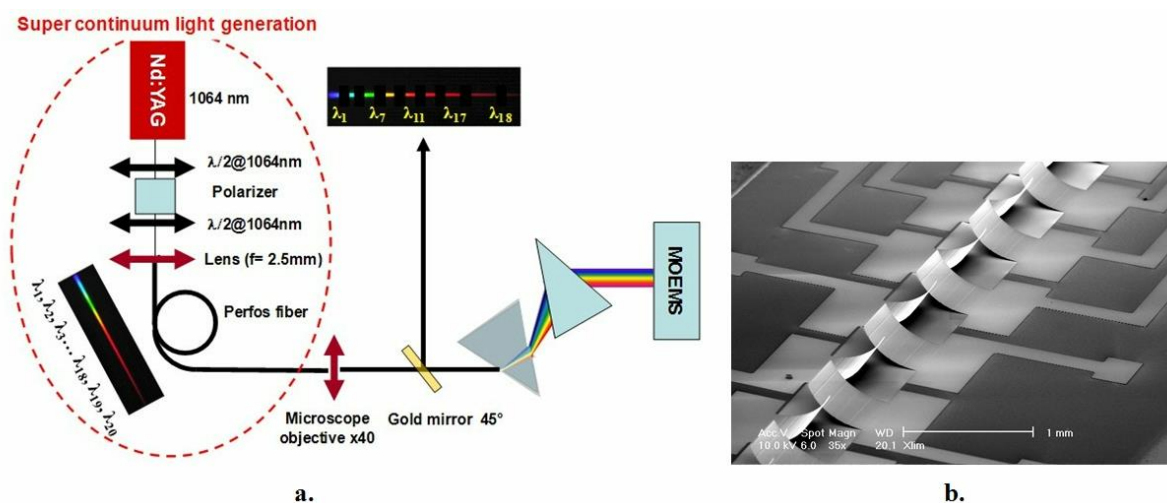
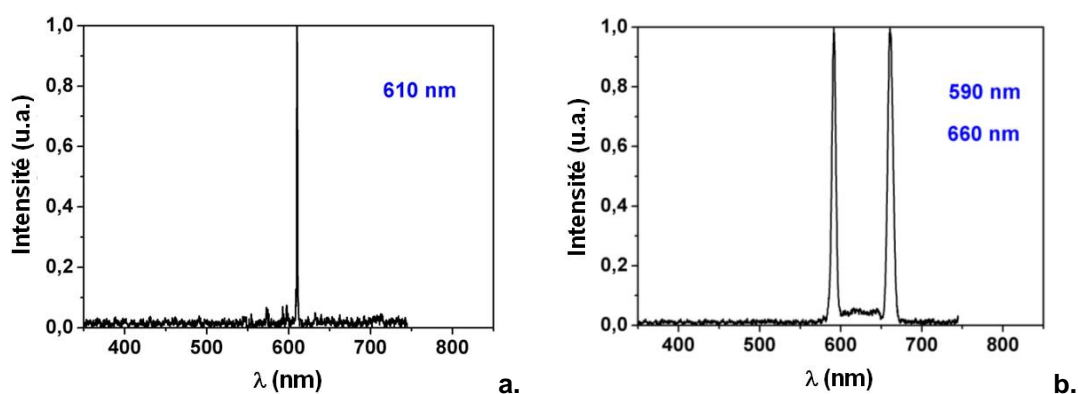


Figure 1.25. a. Représentation schématique du système de sélection multi longueur d'onde à fréquence de modulation variable et b. image par MEB d'une matrice d'éléments MOEMS de type cantilever.

Le nombre de raies spectrales sélectionnées dépend directement du nombre d'éléments électromécaniques actionnés. La largeur spectrale de chaque raie est fixée par l'étalement spectral réalisé par les prismes et par la largeur du micro-miroir MOEMS. Ce paramètre peut donc être ajusté par l'écart entre les deux prismes et par l'utilisation d'autres éléments plus ou moins dispersifs. Enfin, le retard temporel entre les signaux excitateurs est ajustable par étirement mécanique des fibres optiques. La combinaison d'une source de lumière blanche multi-longueur d'onde et d'un microsystème réalisé en technologie MEMS nous a permis de découper et de moduler sélectivement différentes longueurs entre 360 nm et 745 nm. Des exemples de découpage spectral résultant de l'actionnement synchrone de un, deux et quatre éléments électromécaniques sont présentés respectivement sur la Figure 1.26. La fréquence d'actionnement a été fixée à quelques hertz afin de permettre une visualisation du phénomène par l'analyseur de spectre optique. Néanmoins, aucune limitation en terme de modulation n'est à prévoir entre 1 et 200 kHz pour des MOEMS de type pont et entre 1 et 10 kHz pour ceux de type poutre courbée.



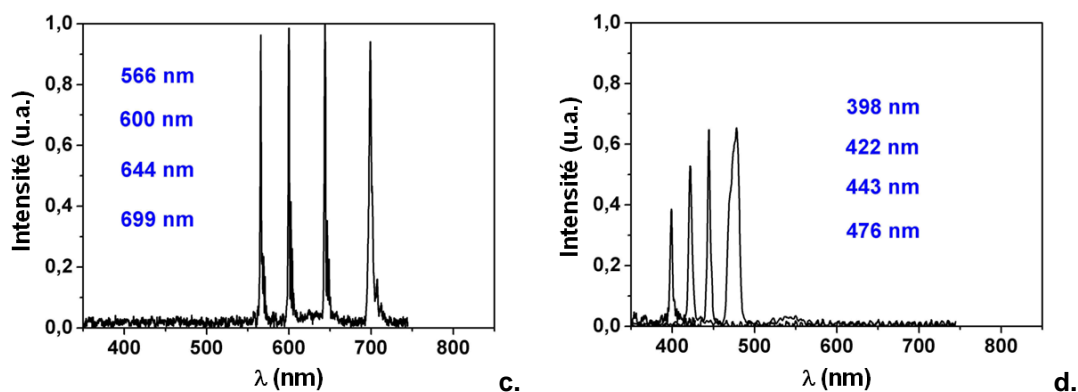


Figure 1.26. Exemple de découpage spectral lors de l'actionnement synchrone d'un (a.), de deux (b.) et de quatre éléments (c, d) MOEMS du système de sélection spectrale.

Les largeurs de raies sélectionnées sont comprises entre 4 nm et 15 nm, et varient en fonction des longueurs d'onde des radiations découpées. La densité spectrale de puissance est également liée à l'aspect dispersif. La gestion de la puissance spectrale relative entre les différentes raies utilisées dépend de la largeur des miroirs et de la planéité du spectre blanc d'origine (ici ~3 dB de fluctuation sur la bande 398 nm 748 nm). La densité de puissance est alors comprise entre 60  $\mu$ W, pour les radiations de largeur spectrale égale à 4 nm, et 225  $\mu$ W pour les raies plus larges (15 nm). Des filtres de couleur repartis dans le plan spectral devant les actionneurs électromécaniques pourront introduire un degré de liberté supplémentaire au niveau du flux lumineux désiré.

En conclusion, nous avons réalisé un système innovant dédié à l'analyse et à la caractérisation des éléments biologiques, composé de plusieurs éléments originaux ayant fait l'objet d'études spécifiques. Ce système a fait l'objet d'une valorisation par le biais d'un dépôt de brevet CNRS et par la publication de nombreux articles dans des journaux spécialisés (Brevet : V. Couderc, C. Lesvigne, P. Leproux, D. Bouyge, A. Cruntéanu ; « *Procédé et dispositif de caractérisation d'éléments microscopiques* » Déposé le 10 octobre 2007 ; N° 07/07098, avec une extension aux pays PCT sous le titre: « *Method and device for characterizing microscopic elements* », WO2009/087287 du 16.07.2009, et des demandes en cours au Japon et aux USA.).



# Discrete spectral selection and wavelength encoding from a visible continuum using optical MEMS

D Bouyge<sup>1</sup>, C Lesvignes-Buy<sup>1</sup>, A Crunteanu<sup>1</sup>, V Couderc<sup>1</sup>, P Leproux<sup>1</sup>,  
P Blondy<sup>1</sup> and L Lefort<sup>2</sup>

<sup>1</sup> XLIM Research Institute-CNRS UMR 6172, University of Limoges, 123 avenue Albert Thomas,  
87060 Limoges, France

<sup>2</sup> Horus Laser SAS, Ester Technopole, BP 6935, 87069 Limoges Cedex, France

E-mail: [aurelian.crunteanu@xlim.fr](mailto:aurelian.crunteanu@xlim.fr)


Received 14 February 2008, in final form 20 March 2008

Published 2 May 2008

Online at [stacks.iop.org/JMM/18/065010](http://stacks.iop.org/JMM/18/065010)

## Abstract

We report on a novel optical system for discrete selection of precise, user-defined spectral regions from the emitted spectrum of a white light source. The device, which is based on an array of electrostatically actuated, achromatic micro-mirrors, allows us to select signals with spectral widths between 4 and 15 nm from the super-continuum ( $\sim 400$  to  $\sim 750$  nm), with an extinction ratio of more than 90% and a spectral power density of  $15 \mu\text{W nm}^{-1}$ . Each optical MEMS element from the array can be switched asynchronously at a selected frequency performing both the spatial selection and the frequency modulation of a specific narrow spectral region. The method we describe allows the spectral and/or temporal and polarization encoding of the selected spectral bands and may find extensive applications in biomedical research.

 This article features online multimedia enhancements

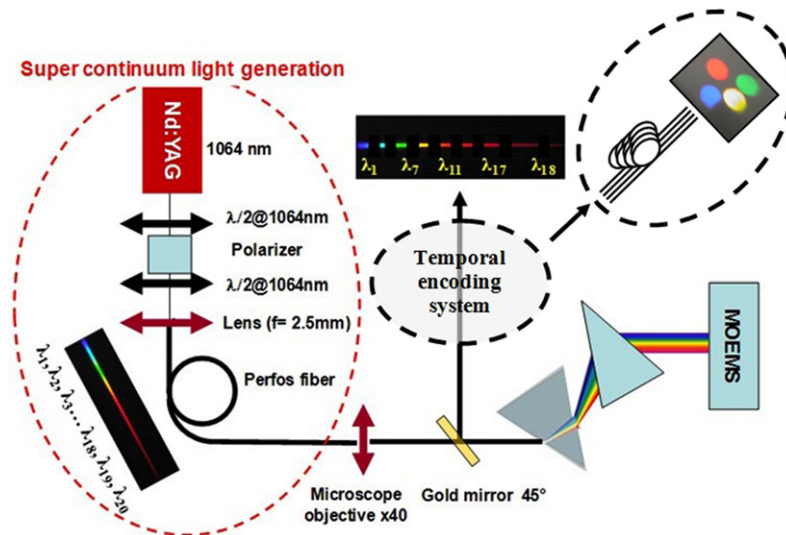
(Some figures in this article are in colour only in the electronic version)

## 1. Introduction

Flow cytometry is one of the most employed techniques in biomedical research with extensive application in the cellular and molecular diagnosis and/or sorting [1–5]. Basically, the technique is based on detecting and correlating the emitted signals from specific populations of cells/particles flowing at high speed in front of a light source (usually, a laser beam) [1]. After the absorption at a specific wavelength of the light beam, the cells or some sub-sets of cell populations re-emit a fluorescence signal at a different wavelength. The analysis of the collected fluorescence signals allows us to sort the cell population or to detect the presence of a specific modification in the cell behavior. The diagnosis by fluorescence analysis of specific cells from a larger particle collection is generally done by introducing different fluorescent markers (fluorochromes) in every one of the investigated cells [4, 5]. Each fluorochrome responds to a specific excitation wavelength that can be

potentially associated with a monochromatic laser source. The number of the markers is limited by the overlapping of their spectral emission. Although there are practical solutions to compensate it, this superposition drastically limits the diagnosis precision. Moreover, fluorochrome multiplication introduces a high complexity at the excitation source level, since several independent monochromatic laser sources need to be used.

A promising solution is to introduce a specific encoding (frequency, temporal or polarization modulation) on every excitation signal dedicated to a fluorochrome for precise identification of each marker's fluorescence emission. The frequency modulation can be achieved by using acousto- or electro-optics modulators [6, 7], and the fluorescence spectrum of a specific marker can be identified by adding a frequency analysis along with the chromatic one. However, the frequency modulation generated by using electro- or acousto-optics modulators has major drawbacks: wavelength



**Figure 1.** Principle of the spectral selection and encoding system based on a super-continuum beam generator and an array of optical MEMS.

sensitivity, chromatic aberrations [8, 9] and increasing costs when using a high number of fluorochromes. An alternative solution for temporal or frequency encoding is the use of micro-opto-electromechanical components (optical MEMS or MOEMS). The properties of these devices (compact, scalable, low insertion losses, low cost, polarization and vibrations insensitive) permit, besides the extensive use in the optical telecommunications domain (optical cross connects, wavelength selection in IR) [10], their widespread integration in innovative biomedical systems. Already, systems incorporating 2D or 3D torsional micro-mirrors (endoscopes or scanning optical microscopes) are subject to intense development and some are close to the stage of marketing [11, 12]. We may also mention the development of innovative concepts in the field of remote chemical sensing systems using programmable diffractive optical elements (array of electrostatically actuated grating-like micro-mirrors) for synthesizing infrared spectra of real compounds [13, 14].

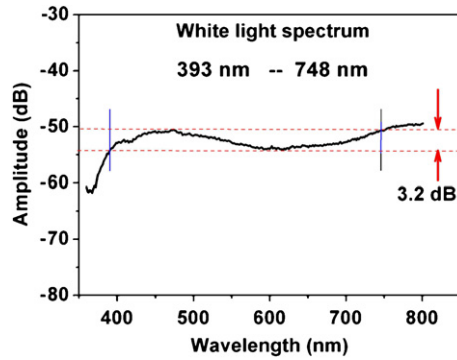
Within this framework we propose an original solution that may find widespread applications to cell diagnosis, which allow obtaining a large number of excitation beams with different wavelengths from a single super-continuum laser source. The fast, adaptive selection of narrow spectral regions from the broadband white light spectrum is realized by an array of achromatic electromechanical micro-mirrors (MOEMS elements). Each of the selected beams can be encoded by using polarization, frequency modulation and time delay for, i.e., precise analysis of the obtained fluorescent signals in a flow cytometer.

## 2. Experimental set-up

The principle of the optical system for spectral selection and encoding is presented in figure 1. First, we generate a white light beam having a broadband spectrum in the visible region ( $\sim 400\text{--}750\text{ nm}$ ), which is further collimated by using

a microscope objective and then spectrally dispersed by a pair of prisms with high transmission in the UV-visible regions. Then, the dispersed spectrum is focused by a cylindrical lens ( $f = 50\text{ mm}$ ) on an array of 20 individual micro-mirrors with high reflectivity discrimination (10 dB) between the actuated and non-actuated states (cantilever-type MOEMS elements, see section 2.2). Thus, by convenient selection of the dispersive prisms/focused optics, the broadband beam is spectrally divided on the entire array of micro-mirrors (each of the mirrors is related to a specific wavelength). In the non-actuated state, the up-curved micro-mirror does not reflect the light backward to the prisms. When actuated, the micro-mirror changes its position and obtains a plane profile, reflecting its corresponding spectral region toward the dispersive elements. The beam carrying the selected wavelength can be collected afterwards and redirected (using a gold mirror or another reflective system) toward a spectral analysis system or in the analysis zone of a flow cytometer. In the set-up presented in figure 1, the incoming super-continuum beam and the collected spectra from the spectral selector are not collinear: the beam from the white light source passes aside this gold mirror and is incident on the prism couple while the collected beam returning from the micro-mirrors is reflected on the gold mirror (the out-of-axis positions of the two beam paths can be easily done by adjusting the relative positions of the two prisms).

The addition of a temporal encoding system after the spectral selection can also be added to the primary setup. This system is realized using several optical fibers with different lengths. Each wavelength is coupled in only one fiber that induces a temporal delay between the selected pump wavelengths. The temporal encoding allows a sequential analysis of fluorescence and increases the diagnosis precision. The encoded system tested separately is composed of four standard multimode optical fibers with  $900\text{ }\mu\text{m}$  core diameters and with different lengths (1 m, 3 m, 5 m and 7 m). Of course, the number of the fibers inducing the temporal delay can



**Figure 2.** Broadband white light spectrum used for the spectral selection experiments

be increased correspondingly to the number of wavelengths needed for a specific analysis.

One can select a specific wavelength or a collection of particular wavelengths by simply actuating one or more MOEMS elements related to the desired spectral region. The number of the selected spectral lines depends directly on the number of the actuated micro-mirrors, while the spectral spreading of the white light beam and the dimensions of the mirrors fix their spectral width. This parameter can also be adjusted by modifying the distance between the prisms or by using different dispersive elements.

Since each micro-mirror from the array can be asynchronous switched at a specific frequency, the system can be used to modulate and to encode (in the frequency domain) each of the spatially and spectrally selected beams.

### 2.1. Super-continuum light generation

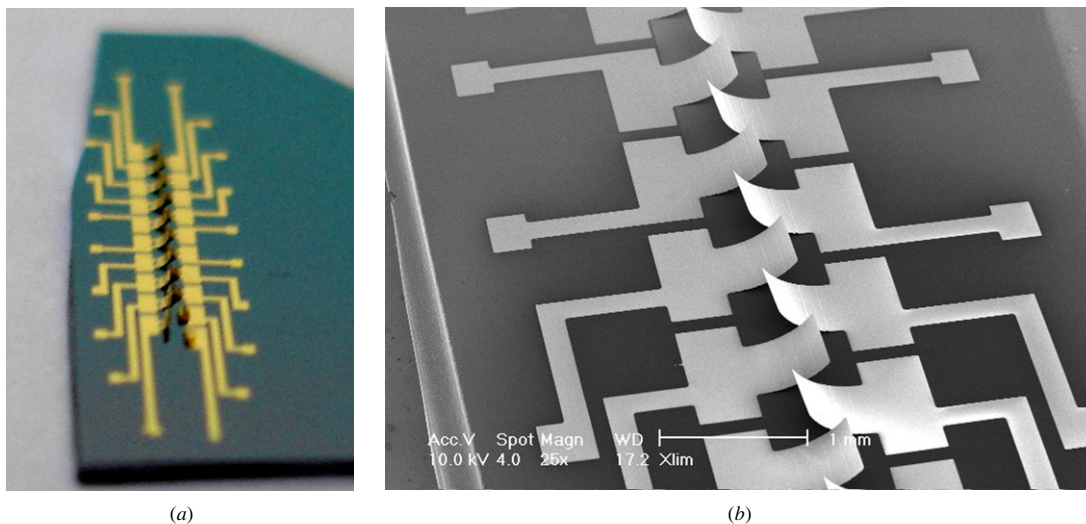
The super-continuum emission is obtained in a similar manner as described in [15]. The first element is a Q-switched Nd:YAG

laser which employs a saturable absorbent (YAG:Cr<sup>4+</sup>) and emits 600 ps long pulses at 1064 nm with a repetition rate of 6 kHz. The average power is 45 mW, which represents pulses with the peak power close to 12.5 kW. The laser beam is coupled in a nonlinear air-silica micro-structured optical fiber, leading to broadband radiation generation in the visible (from ~400 nm to ~750 nm) with a spectral power density of  $15 \mu\text{W nm}^{-1}$ . The super-continuum spectrum, presented in figure 2, shows a flatness of about 3 dB for the considered visible spectrum. Because of the large asymmetric fiber design, the visible radiations are linearly polarized on the entire spectral domain.

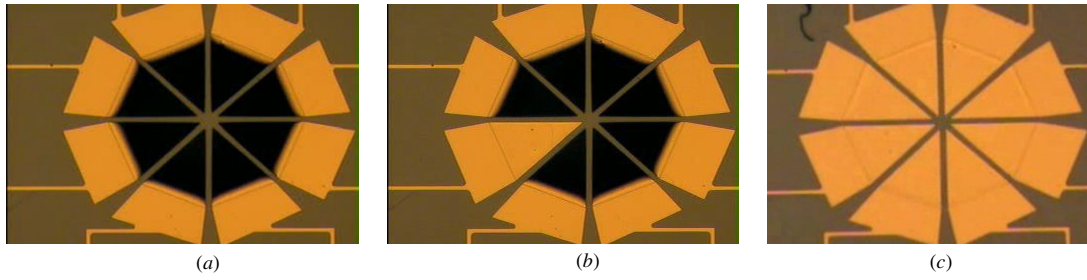
### 2.2. Micro-mirrors modulator array

As mentioned before, the spectral selection array we developed consists in a set of 20 up-curved, metallic micro-mirrors, as presented in figure 3. They are  $500 \mu\text{m}$  wide and  $600 \mu\text{m}$  long metallic cantilevers spaced by  $20 \mu\text{m}$ . The component is obtained using a low-cost, batch and simple micro-fabrication process as presented earlier [16, 17].

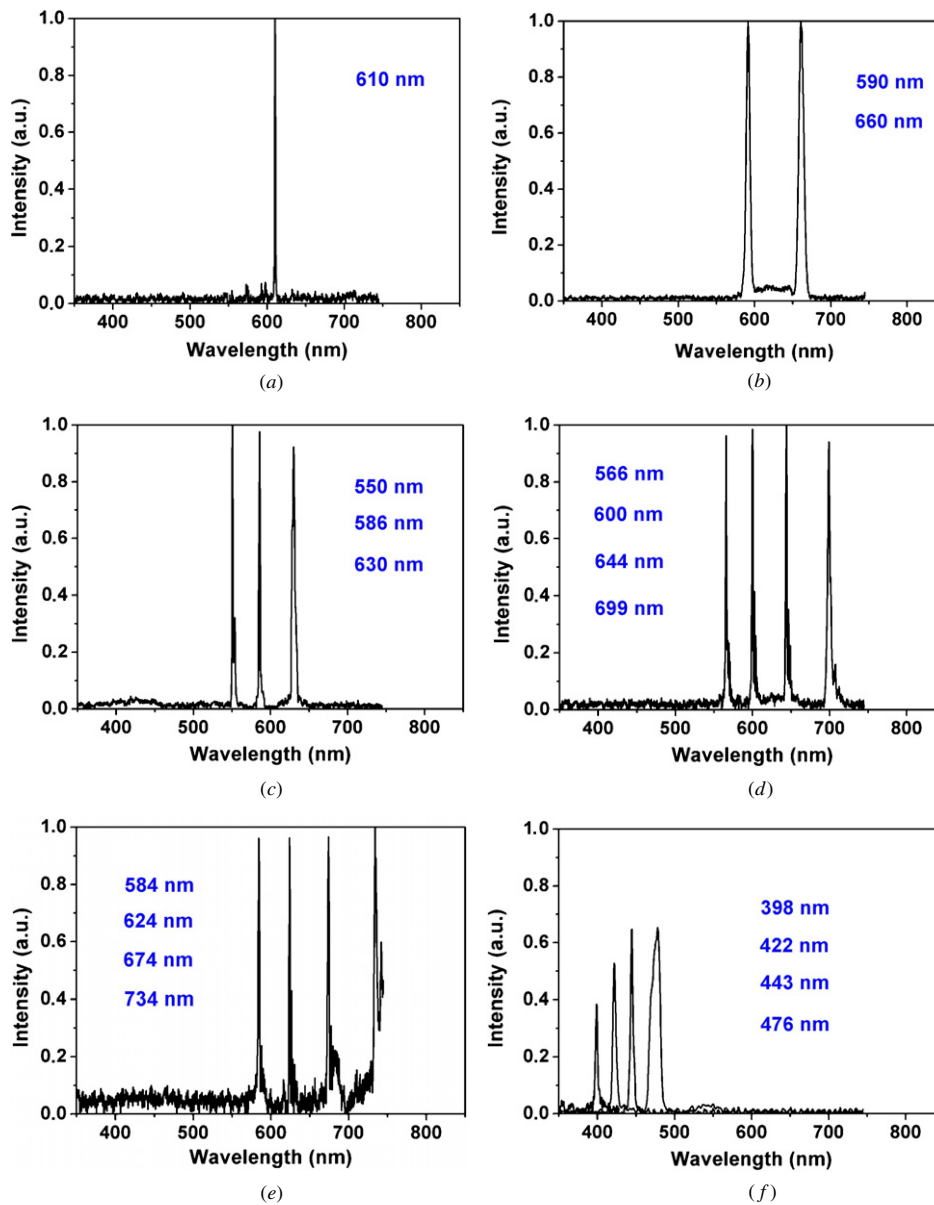
It is fabricated on a low resistivity Si substrate (acting as a common, lower electrode) on which a  $1 \mu\text{m}$  thick SiO<sub>2</sub> layer is thermally grown for electrical isolation. First, we define a patterned sacrificial polymer layer (PMGI SF-6 from MicroChem,  $0.5 \mu\text{m}$  thick) using photolithography. Then, we deposit a Cr/Au ( $40 \text{ \AA}/800 \text{ \AA}$ ) seed layer followed by a  $1.5 \mu\text{m}$  thick electroplated gold layer and a 10 nm thick Cr stress layer (which provide the necessary stress gradient for obtaining 15–20  $\mu\text{m}$  high cantilevers at their tip). Finally, a 100 nm gold layer is thermally evaporated for obtaining high, broadband reflectivity in the visible-IR spectral domain. The foldable areas of the micro-mirrors (defined on the sacrificial layer area), their attachment regions on the substrate and the polarization lines are patterned by wet etching the multi-layer



**Figure 3.** (a) Optical microscopy view of the array of the MOEMS device before wiring and packaging and (b) scanning electron micrograph (SEM) of part of the curled micro-mirrors array.



**Figure 4.** Ring-type arrangement of triangular up-warded micro-mirrors ( $200\ \mu\text{m}$  wide,  $250\ \mu\text{m}$  long) at different positions during actuation: (a) up-state position (normal, non-actuated state), (b) asynchronous actuation of one triangular micro-mirror and (c) synchronous actuation of all the micro-mirrors in the ring.



**Figure 5.** Emitted spectra observed when (a) one, (b) two, (c) three and four (d)–(f) different micro-mirrors are actuated.



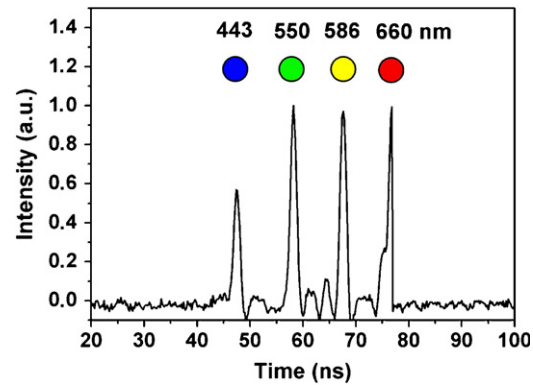
(Cr/Au/Cr/Au) metallic stack. At the end, the sacrificial material is removed in a wet bath and the device is dried in a hot oven or by using a critical point dryer for avoiding stiction. After drying, the areas forming the micro-mirrors will warp upside due to the stress induced by the upper Cr layer (see figure 3(b)). By applying a voltage between the Si substrate and the polarization line corresponding to one of the mirrors, this one is attracted toward the substrate due to the generated electric field. Typical actuation voltages are in the range of 40 V with variations measured between each of the mirrors of less than 1 V. When actuated using a square-type actuation waveform with amplitude corresponding to the actuation voltage and frequencies up to 15 kHz (corresponding to the mechanical resonant frequency of the elements), the mirrors will periodically move up and down. A light beam directed on the MOEMS will be periodically deflected or modulated at the same frequency.

The functioning principle of these types of devices (stressed, cantilevers-type micro-mirrors) is illustrated in figure 4(a)–(c) and in the additional multimedia material [stacks.iop.org/JMM/18/065010](http://stacks.iop.org/JMM/18/065010) (two video files), representing a ring-type arrangement of triangular micro-mirrors (200  $\mu\text{m}$  wide, 250  $\mu\text{m}$  long, 33  $\mu\text{m}$  high deflection at their tips, 45 kHz resonant frequency) for which one can actuate one of the elements in the ring (figure 4(b) and the first movie and 2 Hz actuation frequency) or all of the mirrors in the ring (figure 4(c) and the second movie at actuation frequencies between 2 and 5 Hz). Although this type of arrangement was not effectively used in the experiments reported here, it exemplifies in a more compact and intuitive way the behavior of stressed cantilevers when actuated in both synchronous and asynchronous modes. The triangular micro-mirrors are similar (conception, fabrication and general properties) with the linear array of rectangular-type elements used to obtain the spectral selection from the super-continuum beam.

As already mentioned, each of the micro-mirrors of the spectral selection module is achromatic, polarization insensitive, presents high reflectivity discrimination during actuation (as illustrated in figure 4 and in the additional video files) and can be actuated independently at frequencies ranging from a few Hz to 15 kHz.

### 3. Results and discussions

By using the experimental system shown in figure 1, we realized the spectral selection and the selective modulation of different parts from the super-continuum broadband spectrum. A synchronous actuation of one, two, three and four micro-mirrors results in selecting wavelengths from different parts of the incident beam, as shown in figures 5(a)–(c) and figures 5(d)–(f), respectively. The high reflectivity discrimination of MOEMS elements during their actuation allows extinction ratios up to 90%. As observed from the images in figure 5, it is possible to select specific wavelengths from the entire incident spectrum (398–734 nm). The spectral widths of the selected beams range between 4 nm and 15 nm with power densities between 60  $\mu\text{W}$  (for the 4 nm wide beams) and 225  $\mu\text{W}$  (for the 15 nm wide ones).



**Figure 6.** Example of temporal encoding of four wavelengths coupled in optical fibers with different lengths. The relative delays with respect to the first wavelength are 10 ns, 20 ns and 38 ns.

The actuation frequency of the micro-mirrors has been fixed at 2 Hz for clearly observing and analyzing the spectral selected beams with a spectrum analyzer. No modulation limitation would occur below 15 kHz in the case of the specific design presented (square, 500  $\times$  600  $\mu\text{m}$  two cantilever-type micro-mirrors in figure 3). The use of bridge-type micro-mirror arrays [17] will increase the modulation frequency up to 200 kHz. Moreover, the fabrication of specific triangular arrays similar to those presented in figure 4 and in the associated multimedia files [stacks.iop.org/JMM/18/065010](http://stacks.iop.org/JMM/18/065010) will not only permit a higher modulation (45 kHz), but they may also act as spatial variable slits, in which one can define the width of the spectral selected beam.

### 4. Temporal encoding

By modifying the prisms' alignment, it is possible to separate the wavelengths chosen after a round trip in the spectral selection system. It is then possible to couple each selected wavelength in distinctive optical fibers for obtaining temporal encoding. Within this purpose we selected four radiations located at 443 nm, 550 nm, 586 nm and 630 nm, which are respectively coupled in 1 m, 3 m, 5 m and 7 m long fibers. A temporal analysis of the output signal transmitted through the fibers is shown in figure 6. This simple system allows sequential excitation of several fluorochromes and should facilitate the fluorescence analysis. The delay between each wavelength is properly determined by the fluorescence lifetime of each fluorochrome and can be adjusted by changing the fiber length. Further use of polarization-maintaining optical fibers should add a degree of freedom for the encoding system.

### 5. Conclusions

We report a simple and low-cost technique, which allow obtaining the selection of discrete adaptive wavelengths in the visible spectral domains. The optical system combines a super-continuum source with an array of cantilever-type MOEMS elements and allows selecting and modulating precise parts of a broadband spectrum between  $\sim 400$  nm and

~750 nm. The white light source fixes the average power, the duration and the repetition rate of the broadband signal while the micro-mirrors in the array control the frequencies of the selected train pulses at their specific wavelengths and may also temporally encode (by asynchronous actuation) each of the individual wavelengths (in a manner similar to temporal multiplexing). The addition of several optical fibers placed at the device output with a polarization-maintaining system can extend the potential for light encoding (polarization and temporal encoding) with direct application to cell or molecular diagnosis or sorting. The broadband spectrum of the white light beam can be further enlarged down to 360 nm or shifted at higher wavelengths in the IR domain, from 1  $\mu\text{m}$  to 1.9  $\mu\text{m}$ . In this last case, the spectral power density will be higher, up to 40  $\mu\text{W nm}^{-1}$  and the optical system we present may broaden its possible domains of applications (i.e. telecommunications).

## Acknowledgment

This work was partially supported by the French Research Agency (ANR) through 'FONOTEAM' program.

## References

- [1] Givan A L 2001 Principles of flow cytometry: an overview *Methods Cell Biol.* **63** 19–50
- [2] Baumgarth N and Roederer M 2000 A practical approach to multicolor flow cytometry for immunophenotyping *J. Immunol. Methods* **243** 77–97
- [3] Roederer M, De Rosa S, Gerstein R, Anderson M, Bigos M, Stovel R, Nozaki T, Parks D, Herzenberg L and Herzenberg L 1997 8 color, 10-parameter flow cytometry to elucidate complex leukocyte heterogeneity *Cytometry* **29** 328–39
- [4] Hassa C, Paul P H and Hanson R K 1987 Laser-induced fluorescence modulation techniques for velocity measurements in gas flows *Exp. Fluid* **5** 240–6
- [5] Telford W G 2004 Analysis of UV-excited fluorochromes by flow cytometry using near-ultraviolet laser diodes *Cytometry A* **61** 9–17
- [6] Kapoor R and Casstevens M 2003 Evaluation of multicomponent mixtures using modulated light beams *US Patent* 2003205682
- [7] Nerin P and Lefevre D 2006 Device and method for multiparametric analysis of microscopic elements *Patent* WO2006111641
- [8] Schnell S, Ostroumov V G, Breguet J, Luthy W A R, Weber H P and Shcherbakov I A 1990 Acoustooptic Q switching of erbium lasers *IEEE J. Quantum Electron.* **26** 1111–4
- [9] El-Sherif A F and King T A 2003 High-energy, high-brightness Q-switched Tm<sup>3+</sup>-doped fiber laser using an electro-optic modulator *Opt. Commun.* **218** 337–44
- [10] Yano M, Yamagishi M and Tsuda T 2005 Optical MEMS for photonic switching—compact and stable optical crossconnect switches for simple, fast, and flexible wavelength applications in recent photonic networks *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **11** 383–94
- [11] Jung W, McCormick D T, Zhang J, Wang L, Tien N C and Chen Z 2006 Three-dimensional endoscopic optical coherence tomography by use of a two-axis microelectromechanical scanning mirror *Appl. Phys. Lett.* **88** 163901
- [12] Dickensheets D L and Kino G S 1996 Micromachined scanning confocal optical microscope *Opt. Lett.* **21** 764
- [13] Sinclair M B, Butler M A, Kravitz S H, Zubrzycki W J and Ricco A J 1997 Synthetic infrared spectra *Opt. Lett.* **22** 1036–8
- [14] Zhou G, Tay F E H and Chau F S 2003 Design of the diffractive optical elements for synthetic spectra *Opt. Express* **11** 1392–9
- [15] Champert P-A, Couderc V, Leproux P, Février S, Tombelaine V, Labonté L, Roy P, Froehly C and Nérin P 2004 White-light supercontinuum generation in normally dispersive optical fiber using original multi-wavelength pumping system *Opt. Express* **12** 4366–71
- [16] Bouyge D, Sabourdy D, Crunteanu A, Blondy P, Couderc V, Lhermite J, Grossard L and Barthélemy A 2007 Integration of micro-electro-mechanical deformable mirrors in doped fiber amplifiers *Microsyst. Technol.* **13** 1607–13
- [17] Crunteanu A, Bouyge D, Sabourdy D, Blondy P, Couderc V, Grossard L, Pioger P H and Barthélemy A 2006 Deformable micro-electro-mechanical mirror integration in a fibre laser Q-switch system *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **8** S347–51



#### 1.4. LASER FIBRE A MOEMS FONCTIONNANT EN REGIME DE SYNCHRONISATION DES MODES LONGITUDINAUX [27]

Nous avons mis en évidence (section 1.2.3) la capacité des dispositifs MOEMS type cantilever à fonctionner sur des harmoniques supérieures à leur fréquences fondamentales de résonance et la possibilité (lors de leur intégration dans une cavité laser à fibre) d'obtenir des impulsions laser à des fréquences de récurrence discrètes de 400 kHz et de 800 kHz, nettement supérieures à leurs fréquences de résonance mécaniques (entre 40 et 150 kHz). Cette observation nous a amené à **transposer ce concept** (fonctionnement sur des harmoniques supérieures à la fréquence de résonance mécanique) **aux dispositifs MOEMS type pont** (ayant des fréquences mécaniques nettement supérieures aux éléments type cantilever) **et ainsi essayer d'atteindre des fréquences de modulation à l'échelle du mégahertz, se rapprochant d'un régime de fonctionnement laser à verrouillage des modes longitudinaux.**

Le régime à synchronisation des modes longitudinaux (ou régime mode-lock) impose une fréquence de modulation dont la valeur est précisément l'inverse du temps de parcours de la cavité ( $f = c/n.L$ , ou  $c$  -est la vitesse de la lumière dans le vide,  $n$ - l'indice de réfraction et  $L$ - la longueur de la cavité). Les cavités lasers fibrés imposent donc des fréquences de modulation comprises en général entre quelques mégahertz et quelques dizaines de mégahertz. Ainsi, en atteignant des fréquences de fonctionnement à l'échelle du mégahertz, les composants MOEMS se présentent comme de nouveaux candidats pour l'obtention du régime mode-lock dans les sources lasers, particulièrement pour les systèmes fibrés.

Les micro-miroirs utilisés ici sont des composants rapides du même type que ceux présentés auparavant pour le déclenchement de sources lasers 0. Il s'agit de poutres métalliques hautement réfléchissantes (tri-couches : Ti/Au/Ti ; épaisseur totale : 0.5  $\mu\text{m}$ ) suspendues par deux côtés opposés à une hauteur d'environ 1.2  $\mu\text{m}$ , au-dessus d'un substrat de silicium (Si) recouvert d'une couche de dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) (Figure 1.27). Cette structure est mieux adaptée à la modulation hautes fréquences que le profil de type cantilever car elle impose une constante de raideur supérieure à la poutre, conduisant à des fréquences de résonance supérieures. Ainsi, lorsqu'on applique une différence de potentiel entre l'électrode supérieure (membrane) et la face arrière du substrat, il apparaît une force électrostatique qui attire la membrane vers le substrat (état bas). Ici, on s'assure que le niveau de tension appliqué soit supérieur à la tension d'actionnement  $V_p$  nécessaire pour amener les deux électrodes en contact (typiquement entre 60 et 80V). Puis, lorsque l'on fait chuter cette tension en deçà de  $V_p$ , la poutre retourne à sa position de repos (état haut) grâce à la force de rappel.

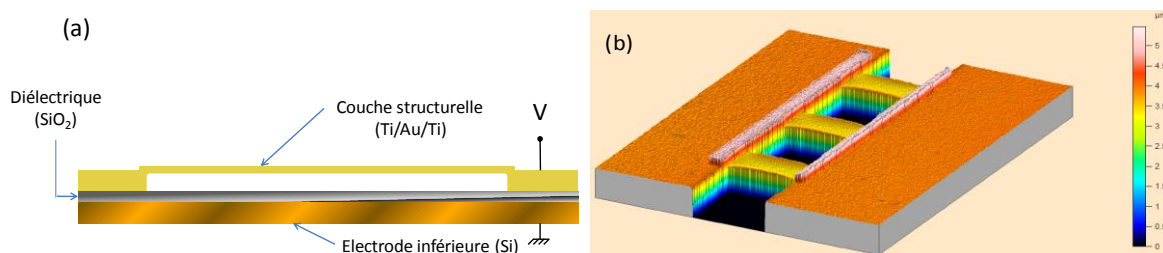


Figure 1.27. a. Profil d'un micro-miroir métallique de type pont et b. visualisation 3D à partir de mesures interférométriques (dimensions des ponts  $100 \times 50 \mu\text{m}^2$ ).

Le profil de sollicitation choisi est un signal carré bipolaire faisant ainsi osciller le composant entre les états haut et bas et conduisant à la modulation du faisceau incident. Afin d'exploiter au maximum la modulation haute- fréquence de ces composants, il est nécessaire de diriger le faisceau vers les zones pour lesquelles la discrimination est la plus forte, c'est-à-dire proche des ancrages. Ils oscillent de quelques hertz à plusieurs centaines de kilohertz (sur leur mode fondamental de vibration), c'est-à-dire avec un seul nœud de vibration au centre de la poutre. Comme expliqué auparavant, pour engendrer le régime à synchronisation des modes longitudinaux dans une source

laser, la fréquence du modulateur doit être en accord avec l'intervalle spectral libre de la cavité. Cela signifie que les modulateurs présentés ici doivent être actionnés au-delà de leur fréquence de résonance fondamentale et osciller sur des modes de vibration d'ordres supérieurs.

Le dispositif laser utilisé est montré sur la Figure 1.28. Il comprend un amplificateur à fibre dopée erbium (EDFA) intégré dans une configuration en anneau. Un circulateur permet de diriger la lumière provenant de l'amplificateur vers un tronçon de ligne qui est constitué d'un coupleur de sortie (50/50), d'un dispositif d'imagerie et du composant MOEMS. Les distances focales du système d'imagerie ( $L_1 = 6,2$  mm et  $L_2 = 8$  mm) permettent d'ajuster la taille du faisceau sur la surface de la membrane.

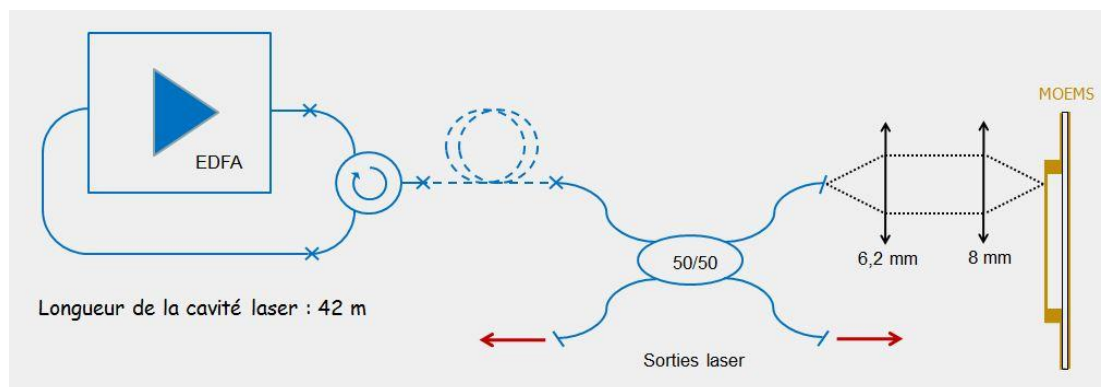


Figure 1.28. Dispositif laser expérimental pour la démonstration de la synchronisation des modes longitudinaux par un micro-miroir déformable.

Pour atteindre des fréquences de modulation élevées (compatibles avec des longueurs de cavités conventionnelles), nous avons utilisé des composants de petites dimensions ( $75 \times 50 \mu\text{m}^2$ ) dont la fréquence de résonance fondamentale est de l'ordre de 200 kHz. Il a ainsi été possible de moduler efficacement une cavité de 60 m de longueur à près de 5 MHz, conduisant à l'apparition d'impulsions de durée 1 ns et d'un léger élargissement du spectre optique (Figure 1.29). L'énergie par impulsion est alors de 20 nJ pour une puissance extraite de 100 mW. Bien que cette durée d'impulsion puisse être considérée comme importante pour le régime à modes synchronisés, ce type de cavité longue contenant un grand nombre de modes longitudinaux à mettre en phase conduit très souvent à ce phénomène.

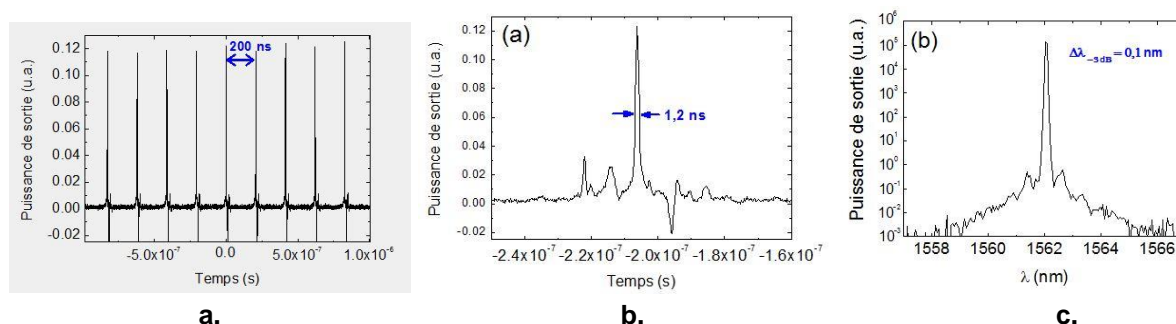


Figure 1.29. a. Génération d'impulsions mode-lock à la fréquence de récurrence de la cavité laser (4.96 MHz) ; b. forme temporelle d'une impulsion laser et c. le spectre d'émission optique du système laser en régime mode-lock.

Nos travaux (développés dans le cadre de la thèse du Dr. Marc Fabert) montrent que les composants MOEMS type pont conçus offrent une modulation optique suffisamment efficace même bien au-delà de leur fréquence de résonance fondamentale et ils peuvent donc être intégrés dans des sources lasers pour l'obtention d'un régime impulsionnel de type verrouillage des modes longitudinaux. **A notre connaissance, ces résultats constituent la première démonstration de l'efficacité de modulation de composants MOEMS dans des sources lasers à fibre à des**

**fréquences de plusieurs mégahertz** [27]. Il est alors désormais possible d'envisager de verrouiller en phase les modes longitudinaux de cavités lasers plus courtes en adaptant la taille, la forme et les matériaux structurels des composants MOEMS. La durée des impulsions, quant à elle, devrait être raccourcie en contrôlant notamment la dispersion chromatique totale de la cavité. Ces nouvelles solutions actives présentent des avantages considérables pour les applications nécessitant des sources lasers à fibre impulsionnelles, telles que le traitement des matériaux, les télécommunications ou encore le domaine médical, principalement grâce aux améliorations en termes de coûts de fabrication et de potentiel d'intégration.

# Actively mode-locked fiber laser using a deformable micromirror

Marc Fabert,\* Vincent Kermène, Agnès Desfarges-Berthelebot, Pierre Blondy, and Aurelian Crunteanu

XLIM UMR 6172, CNRS/Université de Limoges, 123 Avenue Albert Thomas, 87060 Limoges Cedex, France

\*Corresponding author: marc.fabert@xlim.fr

Received March 23, 2011; revised May 10, 2011; accepted May 10, 2011;

posted May 11, 2011 (Doc. ID 144586); published June 6, 2011

We present what we believe to be the first fiber laser system that is actively mode-locked by a deformable micromirror. The micromirror device is placed within the laser cavity and performs a dual function of modulator and end-cavity mirror. The mode-locked laser provides ~1-ns-long pulses with 20 nJ/pulse energy at 5 MHz repetition rates. © 2011 Optical Society of America

OCIS codes: 060.3510, 140.4050, 230.4110, 230.4685.

Currently, micro-optoelectromechanical devices (usually termed MOEMS) are extensively used as optical switches [1], optical limiters [2], or deformable mirrors [3] for a broad range of applications spanning from telecommunications [1,4] to biomedical imaging and microscopy [5], projection and display systems [6], adaptive optics [7,8], and laser sources [9]. Especially in this last field, MOEMS qualities of achromaticity, polarization independence, low power consumption, and a high potential of integration associated with low-cost fabrication thanks to batch fabrication processes place these components as very good candidates to replace conventional modulators as electro- or acousto-optical modulators (EOMs or AOMs) for short pulse generation [3,10,11]. Metallic MOEMS have been shown to be effective elements to Q-switch fiber laser systems up to 800 kHz repetition rates with pulses as short as 8 ns [11]. Because of the constant reduction of their size and the design improvement of the structural materials composing the micromirrors, MEMS devices achieve increasingly high resonant frequencies, with actuation rates/modulation frequencies of several megahertz [12]. When coupling such a MEMS device with a laser cavity, its high resonant frequencies can potentially induce high-speed modulation of the light inside the cavity, approaching the mode-locking operation regime for the laser system.

A rule of thumb for mode locking a laser cavity consists in modulating the quality factor of the cavity at a repetition rate that corresponds to the intracavity round-trip time. If this condition is fulfilled, the laser system generates a pulse train with a repetition rate of  $f = c/(nL)$ , where  $c$  is the vacuum light velocity,  $n$  is the refractive index, and  $L$  is the laser cavity length. In a perfect case (i.e., all the longitudinal cavity modes are phase locked), the pulse duration is inversely proportional to the spectral bandwidth containing the phase-locked modes. The passive mode-locking techniques are commonly used to obtain subpicosecond pulses in lasers. The main methods employed to passively mode-lock fiber lasers are the ones that benefit from nonlinear effects in fibers or those using intracavity saturable absorbers [13–15]. The main drawbacks of these passive methods are the cw intracavity power needed for achieving mode-locked lasing when using a specific nonlinear device. Conversely, it is rather difficult to adapt the necessary nonlinearity in a CW laser for initiating

self-starting mode locking with a given level of intracavity power. Active mode-locking techniques generally give rise to longer pulses, in particular for long laser cavities (a few tens of picoseconds to a few tens of nanoseconds) [16] are preferred for applications needing the synchronization of the laser pulse train with an external signal or when several lasers must operate synchronously. The active implementations often consist in using AOMs [16] or EOMs [17], which are bulky and expensive elements, generally designed to work at a specific wavelength. On the other hand, thanks to their optical properties (achromaticity, polarization insensitivity) and their batch fabrication process, MEMS-type modulators are of high interest for their introduction in compact and low-cost fiber laser systems.

In this Letter, we propose, for the first time to our knowledge, to introduce and use MOEMS components both as modulators and end-cavity mirrors to achieve mode-lock operation in a fiber laser system. The MOEMS devices presented here are high-speed deformable mirrors with an operating principle similar to those previously used to Q-switch fiber laser cavities [3].

As shown in Fig. 1(a), they are high-reflectivity (>80% at 1550 nm) bridge-type metallic membranes (~0.5-μm-thick Ti/Au/Ti trilayers structure) anchored on both sides and suspended ~1.5 μm above a low-resistivity Si substrate covered by a 1-μm-thick thermally grown oxide (SiO<sub>2</sub>). The bridge-type geometry (fixed-fixed beam) was preferred to cantilever-type one since, for similar dimensions, they present much higher mechanical resonant frequencies relevant for obtaining the mode-locking regime. The dimensions of the fabricated micromirrors range from 50 μm × 50 μm to 200 μm × 100 μm. Although they are not protected by specific packaging, these microcomponents are highly robust, with reproducible properties even at high frequencies. When applying a typical actuation voltage (bipolar square-type waveform with amplitudes from 50 to 80 V<sub>pp</sub>, peak to peak voltage) between the lower electrode (Si substrate) and the upper electrode (the supports and the metallic membrane), the induced electrostatic force attracts the membrane down to the substrate [Figs. 1(c) and 1(d)]. When the applied voltage is below the actuation voltage of the membrane, the micromirror recovers its initial position [Figs. 1(b) and 1(d)].



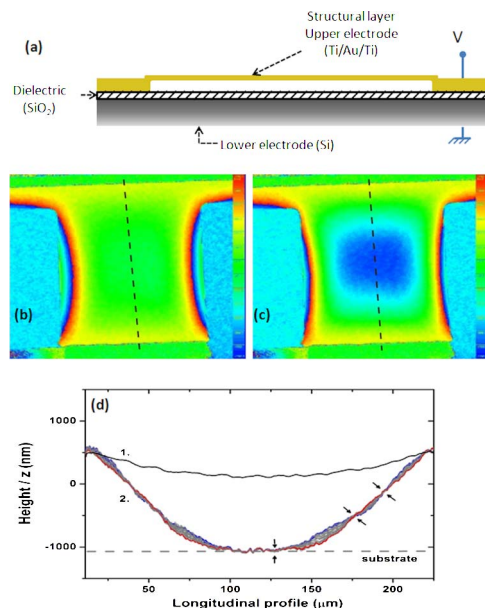


Fig. 1. (Color online) (a) Profile of a metallic bridge-type micromirror. (b), (c) Phase images using a digital holography microscope from LyncéeTec of a  $200\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ }\mu\text{m}$  micromirror membrane at rest (unactuated) and actuated at 1.45 MHz. (d) Longitudinal profiles [along the dotted lines in (b) and (c)] for the membrane at rest (curve 1) and the membrane actuated at 1.45 MHz (curve 2, temporal superposition of 46 profiles acquired during three actuation cycles); the arrows along curve 2 indicates the position of nonvibrating nodes.

At the upper state, the membrane reflects the optical beam in the incident direction, whereas, at the down state, the optical beam is deflected out of the cavity axis (given that the incident light spot on the micromirror is focused on the edge of the membrane close to the anchored region). The fabricated components operate from a few hertz to several hundred kilohertz on the fundamental resonance mode of vibration (i.e., with only one antinode at the center of the bridge), with actuation times inversely proportional to the resonant frequency in the range of  $1\text{ }\mu\text{s}$  (slightly depending on the applied voltage). The magnitude of the primary mechanical resonant frequency of the micromirror beam depends on its geometrical dimensions and stiffness (due to the intrinsic stress developed within the structural materials during deposition). For mode-locking operation, the modulation frequency of the active element should fit the free spectral range of the cavity ( $f = c/(nL)$ ), which depends on the cavity length,  $L$ . Thus, in our experiments described later, for maintaining moderate length laser cavities, the MOEMS devices were actuated very far from their fundamental mechanical resonant frequency. Curve 2 in Fig. 1(d) describes the motion of the membrane at a high frequency of 1.45 MHz, whereas the primary resonant frequency is of 26 kHz. During one cycle, the center of the membrane is maintained in contact with the substrate. The membrane only oscillates on specific parts between nodes indicated by arrows on the example of Fig. 1(d). At such high frequencies, the angular variation leads to a low modification of the quality factor of the cavity in the range of percent. The experimental laser system setup including the fabricated MOEMS device

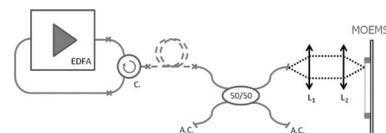


Fig. 2. Experimental setup of the fiber laser system used to demonstrate mode-locked emission with the active MOEMS element. C, circulator; A.C., angle cleaves; L, lenses. The dashed line shows where the long fiber length was inserted in order to reduce the repetition rate of the laser cavity.

is presented in Fig. 2. It consists in an erbium-doped fiber amplifier (EDFA) with a maximum gain of 30 dB inserted in a ring cavity configuration. A circulator  $C$  extracts the light towards the electromechanical modulator through a 50/50 coupler and an imaging system ( $L_1 = 6.2\text{ mm}$  and  $L_2 = 8\text{ mm}$  added in order to carefully adjust the spot size at  $8\text{ }\mu\text{m}$  on the micromirror). The laser emission of the overall system is detected from one of the two free outputs of the 50/50 coupler.

The first time, we voluntarily designed long laser cavities (of 220 and 135 m, respectively) in order to reduce the necessary modulation rate close to the highest modulation frequency values usually used for Q-switching operation (in the range of 1 MHz), and we used micromirror devices with relatively large dimensions ( $200\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ }\mu\text{m}$ ). When applying an actuation voltage to the micromirrors, at frequencies synchronous with the round-trip time of radiation circulating in the fiber laser (of 950 kHz and 1.5 MHz, respectively), short pulses (60 ns) with peak powers about 200 times more than the cw regime appear. The frequency matching is ensured by looking at the electrical spectrum of the laser and superimposing the modulation frequency on the cavity round-trip time. When this condition is fulfilled, and only in this case, we observed a pulse regime. The modulation frequency of the micromirror device can be adjusted at  $\pm 1\text{ kHz}$  to maintain the emission of the pulse train. To reach higher modulation frequencies (compatible with conventional shorter cavity lengths), we used smaller micromirrors (overall membrane dimensions of  $75\text{ }\mu\text{m} \times 50\text{ }\mu\text{m}$ ) actuated at megahertz-range frequencies. In this case, for a laser cavity length of 42 m, we obtained trains of laser pulses with durations of about 1 ns with a repetition rate of almost 5 MHz (4.96 MHz) for 20 W of laser peak power [Figs. 3(a) and 3(b)]. The negative values on the temporal profiles are due to an artifact of the measurement system. For an extracted mean power of 100 mW (gain of the EDFA: 21 dB), the energy per pulse is 20 nJ. The duration of these laser pulses can be considered long for a mode-locked regime but such long laser cavities contain a lot of longitudinal modes to phase lock and can result in delivering long pulses [16,18,19]. The pulse regime appears only when the modulation frequency of the MOEMS matched the cavity free spectral range, proving the mode-lock regime. The bottom of the spectrum peak [Fig. 3(c)] widens significantly when mode locking appears.

For the bridge-type membrane, a rapid analytical calculation of the  $n$ th harmonic vibration mode can be done from Eq. (1), based on [20]

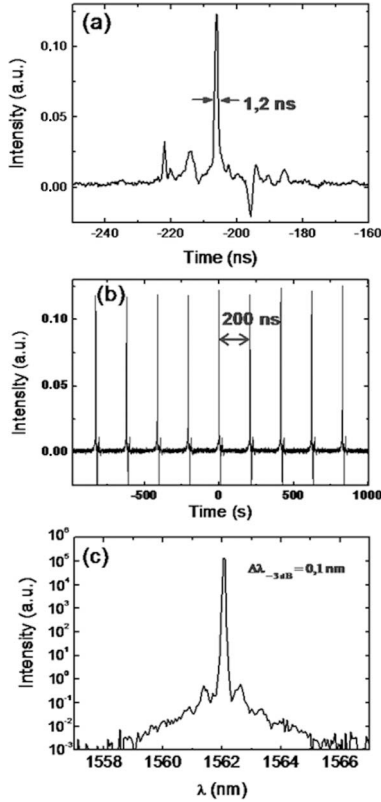


Fig. 3. (a) Pulse shape and (b) pulse train of mode-locked emission at 4.96 MHz; (c) optical spectrum from the ring laser cavity in mode-lock regime.

$$f_n = \frac{\left(n\pi + \frac{\pi}{2}\right)^2}{2\pi\sqrt{12}} \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1)$$

where  $t$  and  $L$  are respectively the thickness and length of the bridge-type membrane,  $E$  and  $\rho$  are the Young modulus and the density of the structural material (i.e., Au), respectively.

The 4.96 MHz operating point for obtaining the mode-lock regime of the laser system is close to the sixth harmonic vibration mode, which occurs at 4.6 MHz in theory. One has to note that this simple analytical model (1) does not take into account the dimensional errors coming from component fabrication, the membrane in-built stress, or the real shape (curved shape) and consequently gives only an approximate value of the harmonic frequencies. As the mode-lock regime is reached, we suppose that 4.96 MHz is close to the sixth harmonic frequency of the MOEMS. However, it is to be mentioned that, when operating the component on these high harmonic frequencies, the incident laser beam position on the membrane must be adjusted much more precisely than in the case of fundamental mode vibration in order to find an appropriate operating point on the membrane surface (providing the necessary modulation contrast for mode-locking operation).

In conclusion, we have demonstrated that the presented MOEMS devices offer a significant and regular

modulation depth, even well above their primary resonant frequency and, thus, they can be used as a novel active element to mode lock a fiber laser. The results presented above constitute, to the best of our knowledge, the first demonstration of MOEMS implementation for high-modulation efficiency of fiber lasers at the megahertz frequency range.

Shorter mode-locked laser cavities can be obtained by adapting the size, shape, or structural materials design of the MOEMS devices, while pulse duration can be considerably reduced by managing the cavity net chromatic dispersion and improving the modulation efficiency of the micromirrors. Mode-locked fiber laser applications in material processing, medicine, or telecommunications could largely benefit from these new active solutions for short pulse generation thanks to the improvement in terms of manufacturing costs and compactness.

## References

1. H. Toshiyoshi and H. Fujita, *J. Microelectromech. S.* **5**, 231 (1996).
2. B. Haji-saeed, W. D. Goodhue, C. L. Woods, J. Kierstead, and J. Khoury, *Appl. Opt.* **48**, 3771 (2009).
3. A. Crunteanu, D. Bouyge, D. Sabourdy, P. Blondy, V. Couderc, L. Grossard, P.-H. Ploger, and A. Barthélémy, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **8**, S347 (2006).
4. P. D. Dobbelaere, K. Falta, L. Fan, S. Gloeckner, and S. Patra, *IEEE Commun. Mag.* **40**, 88 (2002).
5. A. D. Aguirre, P. R. Herz, Y. Chen, J. G. Fujimoto, W. Piyawattanametha, L. Fan, and M. C. Wu, *Opt. Express* **15**, 2445 (2007).
6. R. Hoskinson and B. Stoeber, *Opt. Express* **16**, 7361 (2008).
7. I. W. Jung, Y.-A. Peter, E. Carr, J.-S. Wang, and O. Solgaard, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **13**, 162 (2007).
8. F. Pardo, R. A. Cirelli, E. J. Ferry, W. Y.-C. Lai, F. P. Klemens, J. F. Miner, C. S. Pai, J. E. Nower, W. M. Mansfield, A. Kornblit, T. W. Sorsch, J. A. Taylor, M. R. Baker, R. Fullowan, M. E. Simon, V. A. Aksyuk, R. Ryf, H. Dyson, and S. Arney, *Microelectron. Eng.* **84**, 1157 (2007).
9. J. Masson, R. St-Gelais, A. Poulin, and Y.-A. Peter, *IEEE J. Quantum Electron.* **46**, 1313 (2010).
10. A. Inoue, T. Komikado, K. Kinoshita, J. Hayashi, and S. Umegaki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **46**, L1016 (2007).
11. M. Fabert, A. Desfarges-Berthelemy, V. Kernène, A. Crunteanu, D. Bouyge, and P. Blondy, *Opt. Express* **16**, 22064 (2008).
12. A. Verger, A. Pothier, C. Guines, A. Crunteanu, P. Blondy, J. C. Orlianges, J. Dhennin, A. Broue, F. Courtade, and O. Vendier, *J. Micromech. Microeng.* **20**, 064011 (2010).
13. M. E. Fermann, M. J. Andrejco, M. L. Stock, Y. Silberberg, and A. M. Weiner, *Appl. Phys. Lett.* **62**, 910 (1993).
14. O. Shtyrina, M. Fedoruk, S. Turitsyn, R. Herda, and O. Okhotnikov, *J. Opt. Soc. Am. B* **26**, 346 (2009).
15. H. Zhang, D. Tang, R. J. Knize, L. Zhao, Q. Bao, and K. P. Loh, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 111112 (2010).
16. C. Cuadrado-Laborde, A. Diez, J. L. Cruz, and M. V. Andrés, *Laser Photonics Rev.* **5**, 404 (2011).
17. B. Pelz, M. K. Schott, and M. H. Niemz, *Appl. Opt.* **33**, 364 (1994).
18. X. Liu, *Phys. Rev. A* **81**, 053819 (2010).
19. X. Li, X. Liu, X. Hu, L. Wang, H. Lu, Y. Wang, and W. Zhao, *Opt. Lett.* **35**, 3249 (2010).
20. M.-H. Bao, in *Analysis and Design Principles of MEMS Devices* (Elsevier, 2005), pp. 75.



## 1.5. MULTIPLEXAGE TEMPOREL ET SPECTRAL DE SOURCES LASERS A MOEMS POUR UN FONCTIONNEMENT A HAUTE CADENCE [28]

Nous avons évoqué à la fin de la section 1.3.1 du manuscrit la possibilité de réaliser des systèmes lasers plus complexes, en multiplexant temporellement (ou spectralement) plusieurs cavités lasers individuelles déclenchées chacune par un élément MOEMS distinct. L'intérêt de cette combinaison de plusieurs lasers à MOEMS est **de réaliser une source laser globale à haute fréquence de récurrence et/ou à énergie par impulsions nettement supérieure à celle d'un laser individuel**.

Les composants MOEMS type cantilever que nous développons possèdent, certes, des fréquences de résonance relativement élevées (jusqu'à plusieurs centaines de kilohertz). Cependant, en régime de fonctionnement déclenché (Q-switch) d'une source laser intégrant ces éléments, l'augmentation de la fréquence de répétition peut conduire à une chute de l'énergie stockée dans le milieu à gain et par conséquent à une dégradation des caractéristiques des impulsions (diminution de l'énergie des impulsions et augmentation de la durée). Ce régime impulsif peut même disparaître si les niveaux excités n'ont pas le temps de se remplir suffisamment entre deux cycles. Du côté de la source laser, la génération d'impulsions courtes nécessite l'utilisation de courtes longueurs de fibre dopée, ce qui limite le gain disponible, donc la fréquence de récurrence maximale des impulsions.

Une solution que nous avons explorée pour accroître la fréquence de déclenchement de la cavité et dont nous présentons ici les premiers résultats, est de réaliser un résonateur arborescent en couplant de manière asynchrone N bras amplificateurs. A ces bras amplificateurs sont associés N commutateurs MOEMS oscillant à la même fréquence mais avec des retards fixes de manière à entrelacer leurs modulations temporelles rapides (voir le principe montré sur la Figure 1.30 pour N=4 commutateurs et sources laser). Même si cette technique nécessite l'emploi d'autant de modulateurs que de sources à multiplexer, la technologie MEMS rend possible la fabrication simple de plusieurs modulateurs sur un même dispositif compact, d'une surface de quelques millimètres carrés seulement. En réalisant sur une même puce de silicium, plusieurs micro-miroirs à actionnement indépendant qui seront couplés, chacun, à une cavité laser, on peut donc envisager de concevoir une source laser fibrée compacte à très haute cadence.

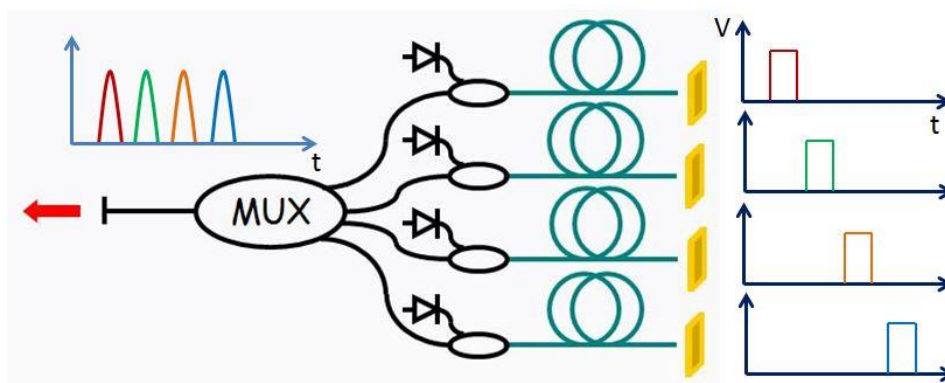


Figure 1.30. Schéma de principe pour la combinaison de plusieurs sources laser intégrant plusieurs dispositifs MOEMS fonctionnant à la même fréquence de modulation mais avec un déphasage temporel fixé pour leur tension d'actionnement ; le multiplexeur global permet d'entrelacer et d'extraire les quatre trains d'impulsions décalés temporellement.

Dans la suite nous présentons les premiers tests de combinaison asynchrone (et synchrone) effectués en utilisant plusieurs sources lasers couplés à des micro-miroirs indépendants.

Pour disposer et maintenir les fibres en place devant les micro-miroirs nous avons réalisé un support constitué d'encoches (V-grooves) sur un substrat de silicium (orientation (100)). Pour des raisons pratiques, le pas de la structure est de 250  $\mu\text{m}$ , correspondant à l'écart entre les cœurs de

deux fibres adjacentes. La distance entre les micro-miroirs a donc été choisie pour respecter ce pas de  $250\ \mu\text{m}$ . Les micro-miroirs réalisés sont orientés tour à tour dans un sens puis dans l'autre de manière à faciliter l'acheminement des différentes pistes d'alimentation nécessaires à l'actionnement indépendant de chacune des membranes (Figure 1.31.a). Les micro-miroirs ont été conçus avec des dimensions allant de  $50 \times 50\ \mu\text{m}^2$  à  $75 \times 75\ \mu\text{m}^2$ , dimensions prévues pour disposer d'une discrimination suffisante sur une plage de fréquences importante.

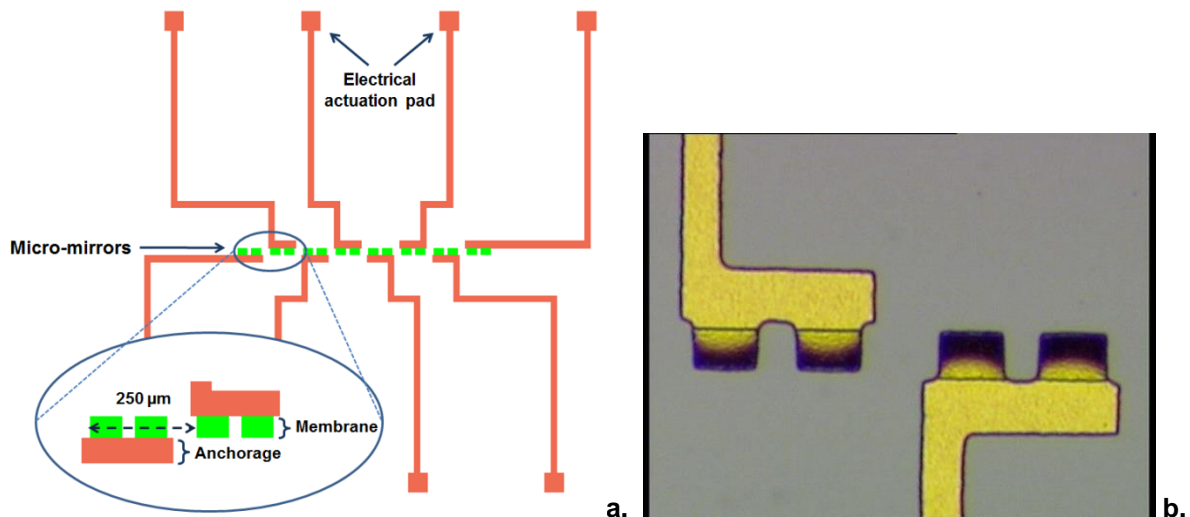


Figure 1.31. a. Principe de réalisation d'un dispositif multi-MOEMS à actionnement asynchrone et b. image de deux couples de micro-miroirs à actionnement indépendant ( $75 \times 50\ \mu\text{m}^2$ ).

Les composants MEMS réalisés (Figure 1.31.b) sont alimentés par un seul générateur de tension disposant de 8 sorties indépendantes capables de fournir un niveau de tension compris entre  $-100\ \text{V}$  et  $+100\ \text{V}$ , permettant l'actionnement asynchrone (ou synchrone) des différents éléments MOEMS. Les MOEMS fonctionnent à la même fréquence d'actionnement mais avec un décalage temporel pour créer les trains d'impulsions entrelacés. Les sous-cavités lasers sont fermées d'un côté par leur micro-miroir correspondant et de l'autre par la face clivée droit du port du multiplexeur commun à toutes les sources. La longueur d'onde d'émission est choisie autour de  $1550\ \text{nm}$  pour pouvoir exploiter un multiplexeur disponible dans le commerce. Ce multiplexeur en longueur d'onde possède 8 canaux spectraux répartis entre  $1539,77\ \text{nm}$  à  $1545,32\ \text{nm}$  et séparés entre eux de  $0,7\ \text{nm}$ . Nous disposons de deux diodes de pompage, fournissant  $400\ \text{mW}$  chacune, dont la puissance est répartie dans les sources formant les sous-cavités à travers une cascade de coupleurs. Sur chacune des voies on trouve également un multiplexeur  $980/1550\ \text{nm}$  pour acheminer la puissance de pompage.

La mise en œuvre pratique du principe de fonctionnement du système global est montrée sur la Figure 1.32. Pour augmenter le facteur de qualité de chaque résonateur (et diminuer la durée des impulsions), la cavité laser arborescente est remplacée par un ensemble de lasers indépendants dont les rayonnements sont mélangés extra-cavité par le multiplexeur. Chaque coupleur de sortie est un réseau de Bragg fibré ( $R = 50\%$ ) dont la longueur d'onde centrale est choisie pour correspondre à chacun des canaux du multiplexeur. L'optimisation du fonctionnement de chaque laser est réalisée en agissant sur le positionnement du micro-miroir mobile devant la fibre dopée. Les impulsions typiques obtenues pour une seule cavité laser sont données sur la Figure 1.33. La durée des impulsions est de  $230\ \text{ns}$  pour une cadence de  $50\ \text{kHz}$ .

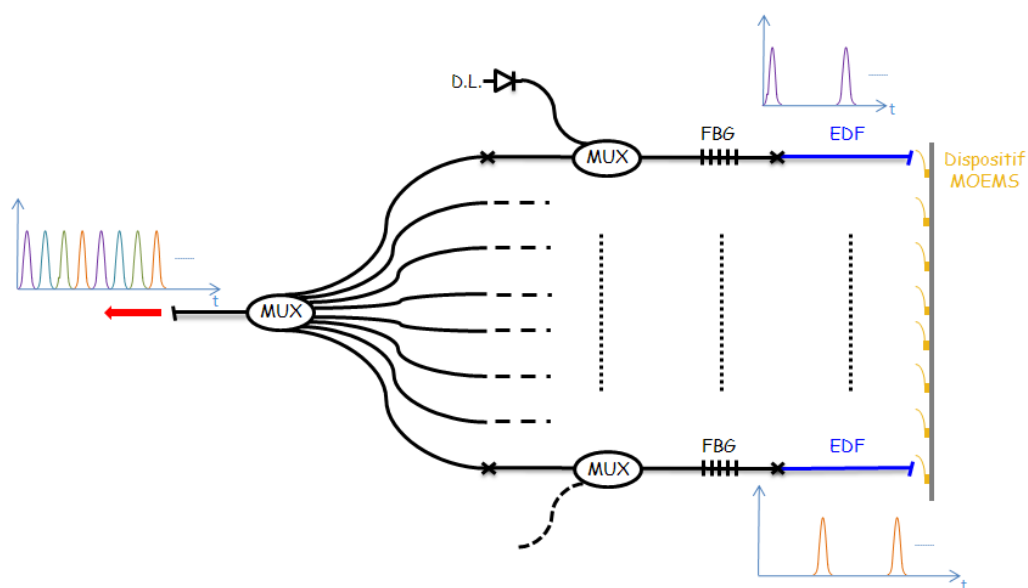


Figure 1.32. Configuration multi-lasers avec multiplexeur hors-cavité.

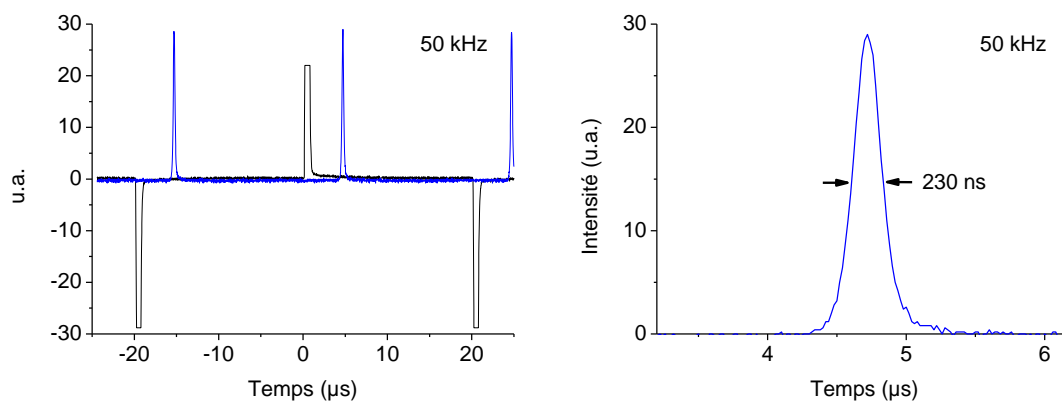


Figure 1.33. Impulsions laser obtenues pour une cavité laser élémentaire fermée par un réseau de Bragg.

Nous avons par la suite actionné deux éléments MOEMS (de deux cavités voisines) à la même cadence mais avec un décalage temporel d'une demi-période. La Figure 1.34 montre les impulsions que nous avons obtenues en optimisant le positionnement de la barrette de MOEMS par rapport à deux sorties fibrées. Les impulsions laser (décalées temporellement) conservent leur durée et leur énergie (d'environ 200 nJ) à une cadence de 50 kHz pour chacune des voies.

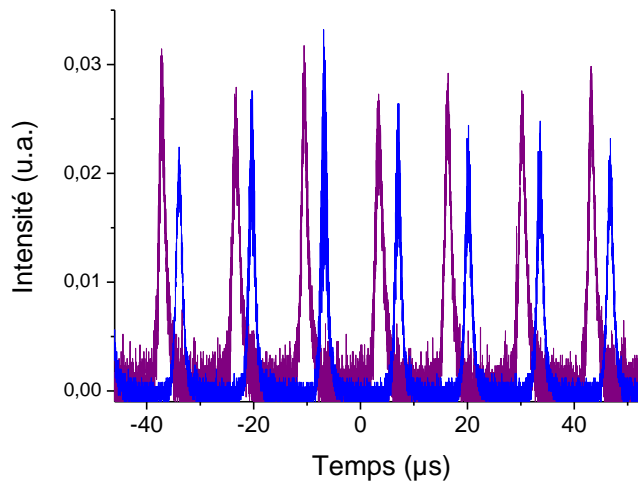


Figure 1.34. Impulsions laser obtenues lorsque deux sources laser sont déclenchées de manière asynchrone par le dispositif MEMS correspondant, à actionnement indépendant.

La configuration laser que nous avons explorée offre d'autres potentialités. Notamment, en rendant les impulsions des différents lasers synchrones, on peut réaliser la combinaison incohérente des rayonnements engendrés. Dans ce cas, c'est l'énergie des impulsions du système global que l'on augmente, sans toucher à la cadence. Ces approches sont pratiquées pour s'affranchir des effets non linéaires (mélange à quatre ondes, auto modulation de phase, diffusions inélastiques de type Brillouin et Raman) qui apparaissent lorsqu'on cherche à extraire des impulsions intenses de lasers à fibre. Elles ont été largement étudiées ces dernières années et récemment des impulsions de durée 2 ns à la cadence de 50 kHz pour une puissance moyenne de 187 W ont été démontrées en combinant les rayonnements de quatre sources lasers sur un réseau de diffraction massif [29]. Dans cette référence, le régime impulsif est obtenu par modulation du courant de la diode de pompage.

En utilisant les MOEMS comme modulateurs lasers, comme ceux que nous avons développés jusqu'alors, ne permettrait pas d'atteindre les performances énergétiques énoncées ci-dessus, en raison notamment des problèmes de tenue au flux. Il est cependant possible d'imaginer des structures qui permettent de travailler avec des densités de puissance sur le MOEMS réduites, sans dégrader le temps de réponse du composant, ou encore d'autres qui fonctionneraient plutôt en transmission.

L'avantage du dispositif que nous avons exploré est lié à sa modularité. Il est donc possible :

- i) d'accroître l'énergie des impulsions à basse cadence, par sommation incohérente des impulsions produites sur les différentes voies lasers,
- ii) ou bien de bénéficier des impulsions d'énergie plus faible mais à haute cadence.

Comme premier résultat, nous avons synchronisé deux voies lasers et nous avons pu démontrer la combinaison de deux rayonnements dont les impulsions ont une énergie de l'ordre de 20 nJ à une cadence de 50 kHz (Figure 1.35). On notera que, dans ce cas, les deux MOEMS étaient disposés sur des supports différents pour faciliter le réglage des lasers élémentaires. Le graphe (a) de la Figure 1.35 représente le train d'impulsions résultant de l'entrelacement des trains d'impulsions individuels (sommation incohérente). Sa fréquence de récurrence (100 kHz) est double de celle d'une source élémentaire. Le graphe (b) correspond, quant à lui, au cas où l'on somme de façon synchrone les impulsions issues des cavités indépendantes. On conserve alors la même cadence que celle d'un seul laser (50 kHz), mais l'énergie des impulsions est double (ici : environ 40 nJ).

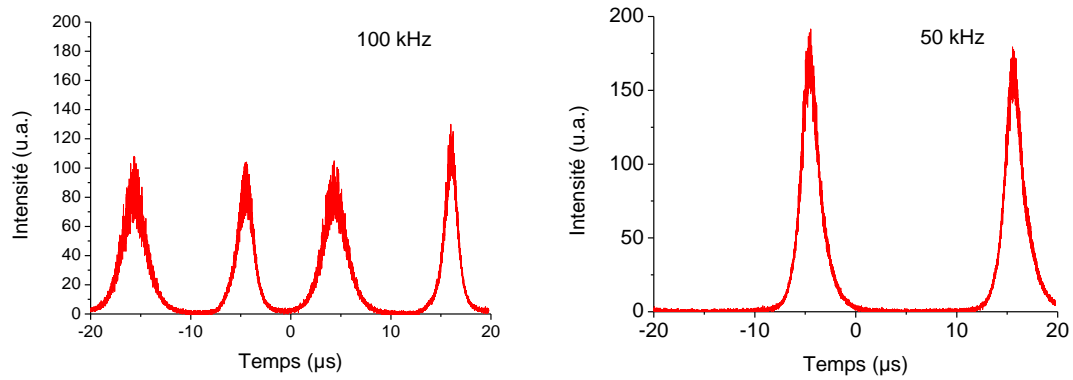


Figure 1.35. Sommation incohérente de trains d'impulsions asynchrones (a) et synchrones (b) émis par deux sources lasers indépendantes.

Les premiers résultats présentés ci-dessus confirment la faisabilité de cette méthode, mais montrent également l'importance de l'optimisation des différents paramètres de chacune des sources (niveau de pompage, position fibre/micro-miroir, etc.)

Par la suite, nous avons fait la démonstration de ce principe pour le cas de la combinaison incohérente et la synchronisation temporelle de quatre systèmes lasers à MOEMS, résultats qui ont été publiés récemment dans Optics Express [28] et qui représentent ***la première démonstration de la combinaison spectrale de lasers à fibre déclenchée par des éléments indépendants MOEMS.***

# Temporal synchronization and spectral combining of pulses from fiber lasers Q-switched by independent MEMS micro-mirrors

Marc Fabert,\* Agnès Desfarges-Berthelemot, Vincent Kermène, and Aurelian Crunteanu

*Xlim UMR 7252, Université de Limoges/CNRS, 123 av. Albert Thomas, 87060 Limoges, France*

*\*Present address: Institut Fresnel, UMR CNRS 7249, Campus Universitaire de Saint Jérôme av. Escadrille Normandie-Niemen, 13397 Marseille, France*

*\*marc.fabert@fresnel.fr*

**Abstract:** We present what we believe to be the first demonstration of spectral combining of multiple fiber lasers Q-switched by independent micro-electro-mechanical system (MEMS). By correlating the actuation of the individual MEMS devices, the associated Q-switched lasers can be operated in either synchronous or asynchronous modes in such a way that their overall combined output may result in high energy emission pulses or in laser emission with higher pulse repetition rate. In a proof-of-principle experiment, we demonstrate the combination of four individual Q-switched lasers (each of them operating at 20 kHz repetition rate) leading to a final laser system generating pulses with a repetition rate of 80 kHz.

©2012 Optical Society of America

**OCIS codes:** (060.3510) Lasers, fiber; (140.0140) Lasers and laser optics; (140.3540) Lasers, Q-switched; (230.4110) Modulators.

---

## References and links

1. S. Klingebiel, F. Röser, B. Ortaç, J. Limpert, and A. Tünnermann, "Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers with high efficiency," *J. Opt. Soc. Am. B* **24**(8), 1716–1720 (2007).
2. M. Laroche, A. M. Chardon, J. Nilsson, D. P. Shepherd, W. A. Clarkson, S. Girard, and R. Moncorgé, "Compact diode-pumped passively Q-switched tunable Er-Yb double-clad fiber laser," *Opt. Lett.* **27**(22), 1980–1982 (2002).
3. J. Y. Huang, H. C. Liang, K. W. Su, and Y. F. Chen, "High power passively Q-switched ytterbium fiber laser with Cr<sup>4+</sup>:YAG as a saturable absorber," *Opt. Express* **15**(2), 473–479 (2007).
4. I. P. Alcock, A. C. Tropper, A. I. Ferguson, and D. C. Hanna, "Q-switched operation of a neodymium-doped monomode fiber laser," *Electron. Lett.* **27**, 84–85 (1985).
5. D. D. Zalvidea, N. A. Russo, R. Duchowicz, M. Delgado-Pinar, A. Diez, J. L. Cruz, and M. V. Andrés, "High-repetition rate acoustic-induced Q-switched all-fiber laser," *Opt. Commun.* **244**(1-6), 315–319 (2005).
6. A. F. El-Sherif and A. K. Terence, "High-energy, high-brightness Q-switched Tm<sup>3+</sup>-doped fiber laser using an electro-optic modulator," *Opt. Commun.* **218**(4-6), 337–344 (2003).
7. A. Crunteanu, D. Bouyge, D. Sabourdy, P. Blondy, V. Couderc, L. Grossard, P. H. Pioger, and A. Barthélémy, "Deformable micro-electro-mechanical mirror integration in a fibre laser Q-switch system," *J. Opt. A, Pure Appl. Opt.* **8**(7), S347–S351 (2006).
8. M. Fabert, A. Desfarges-Berthelemot, V. Kermène, A. Crunteanu, D. Bouyge, and P. Blondy, "Ytterbium-doped fibre laser Q-switched by a cantilever-type micro-mirror," *Opt. Express* **16**(26), 22064–22071 (2008).
9. M. Fabert, V. Kermène, A. Desfarges-Berthelemot, P. Blondy, and A. Crunteanu, "Actively mode-locked fiber laser using a deformable micromirror," *Opt. Lett.* **36**(12), 2191–2193 (2011).
10. Y. Wang and C.-Q. Xu, "Actively Q-switched fiber lasers Switching dynamics and nonlinear processes," *Prog. in Quant. Electron.* **31**, 131–216 (2007).
11. J. Swiderski, A. Zajac, P. Konieczny, and M. Skorczakowski, "Numerical model of a Q-switched double-clad fiber laser," *Opt. Express* **12**(15), 3554–3559 (2004).
12. S. J. Augst, A. K. Goyal, R. L. Aggarwal, T. Y. Fan, and A. Sanchez, "Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers," *Opt. Lett.* **28**(5), 331–333 (2003).
13. A. Sevan, O. Andrusyak, I. Ciapurin, V. Smirnov, G. Venus, and L. Glebov, "Efficient power scaling of laser radiation by spectral beam combining," *Opt. Lett.* **33**(4), 384–386 (2008).



14. O. Schmidt, C. Wirth, D. Nodop, J. Limpert, T. Schreiber, T. Peschel, R. Eberhardt, and A. Tünnermann, "Spectral beam combination of fiber amplified ns-pulses by means of interference filters," *Opt. Express* **17**(25), 22974–22982 (2009).
15. V. Couderc, A. Crunteanu, M. Fabert, F. Dautre, F. El Bassri, D. Pagnoux, and A. Jalocha, "Picosecond pulse generation in a hybrid Q-switched laser source by using a microelectromechanical mirror," *Opt. Express* **20**(5), 5524–5529 (2012).
16. D. Bouyge, A. Crunteanu, D. Sabourdy, P. Blondy, V. Couderc, J. Lhermite, L. Grossard, and A. Barthélemy, "Integration of micro-electro-mechanical deformable mirrors in doped fiber amplifiers," *Microsyst. Technol.* **13**(11-12), 1607–1613 (2007).
17. C. Gutiérrez-Martínez, J. Santos-Aguilar, M. Santiago-Bernal, A. Morales-Díaz, J. A. Torres-Fórtiz, and J. Meza-Pérez, "Reconfiguring the frequency response of dispersive-channel radio over fiber systems by using fiber photonic filters: application to transmission of multiplexed microwave subcarriers," *Microw. Opt. Technol. Lett.* **54**(8), 1869–1874 (2012).

## 1. Introduction

Spectral beam combining or incoherent combining of fiber lasers is seen as a promising technique for laser power scaling and brightness enhancement [1]. On the other hand, multi-wavelength and Q-switched erbium-doped fiber lasers are active research areas for their potential applications in telecommunication network systems, remote sensing, laser processing range finding, or biology and medicine. The pulsed regime in such laser systems is obtained thanks to an active or a passive modulator placed in the laser cavity. In order to control the repetition rate, active modulators are preferred to passive modulators. Indeed, passive Q-switching suffers from timing jitter and the repetition rate can only be managed by changing the pumping level in the laser [2,3]. In the case of active Q-switching, the time jitter is low (depending on the type of modulator) and the repetition rate of the laser is directly managed by the active modulator operating frequency. Numerous active Q-switching techniques have been developed, the simplest ones being bulky mechanical choppers [4] which are not suitable for compact fiber laser systems and restricted to low repetition rates (few hundred of kilohertz). Most often, electro-optic modulators (EOM) or acousto-optic modulators (AOM) are used for active Q-switching. However, in addition to their expensive cost, they suffer from high insertion losses in the case of AOM [5] and from high voltage electronics command needs for EOM [6].

Recently we proposed the use of micro-electromechanical (MEMS) devices as modulators for short pulse generation in Q-switched fiber lasers [7,8]. They present a lot of benefits compared to other active modulators. Indeed, their small size ensures low actuation voltages (less than 100 V) and high operation frequencies. Moreover, thanks to their metallic surface they are achromatic and can play a dual function of modulator and end-cavity mirror. Finally, good repeatability and low cost are ensured by batch fabrication processes. By using these new type of micro-mirror modulators, modulation frequencies from Q-switch regime to mode-lock regime have been reached in fiber lasers (laser pulse duration down to ~1 ns and repetition rates up to ~5 MHz) [9]. The increase of the output repetition rate of a fiber laser will result in increasing the speed, the efficiency and the quality of a practical application process. However, the increase of the repetition rate of an actively modulated Q-switched laser results in a deterioration of the characteristics of the laser emission [8,10,11]. The pulse energy and peak power decrease with the increase of the modulation frequency. Also, for high repetition rates, the laser pulse duration increases. All these drawbacks are due to the shortening of the population inversion period. The laser pulse degradation (pulse duration, energy) can be slightly compensated by increasing the pumping level but parasitic laser oscillations may appear because of high intracavity gain. A suitable solution to increase the repetition rate or pulse energy of Q-switched laser sources without pulse characteristics degradation is the spectral combining of beams from different laser sources operating at slightly different wavelengths [12,13]. For example, *Schmidt et al.* combined laser beams of 25 ns-long pulses and 1.8 mJ energy from four individual fiber lasers whose wavelengths are separated by 3 nm [14]. The overall output of the combined beam reached 6.3 mJ at 10 kHz.

The Q-switch operation is assumed by four acousto-optics modulators (one for each individual laser to combine) and the combining element is made up of three interference filters. The overall set-up including the AOM command electronics becomes in this case relatively complex and bulky. In this paper, we present a simple and compact setup allowing individual fiber lasers combining. It consists of individual fibers lasers (independently Q-switched by MEMS micro-mirrors) spectrally combined and temporally synchronized for obtaining an overall output with either high energy emission or with higher pulse repetition rate.

## 2. MEMS devices

The MEMS device presented here contains eight pairs of micro-mirrors having similar characteristics to those previously used to produce short pulses in Q-switched fiber lasers [8]. These cantilever-type structures are very efficient for Q-switching modulation thanks to the high intracavity loss difference they are inducing in the laser cavity when driving between their extreme actuating states (up- and down-actuation). Their principle of operation within a laser cavity is described on Fig. 1 and detailed in Ref. [15].

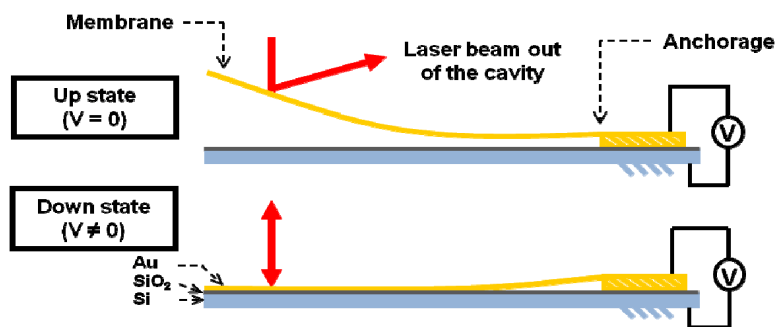


Fig. 1. Design and principle of operation of MEMS-type modulators for Q-switching operation.

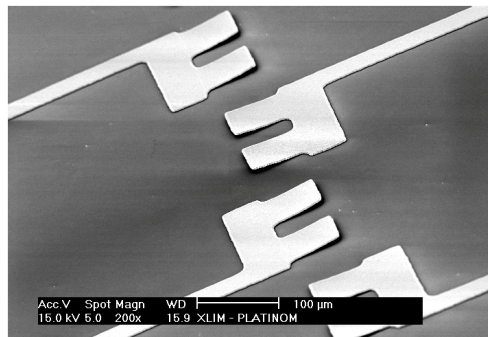


Fig. 2. Scanning electron micrograph image of four pairs of fabricated micro-mirrors.

These mirrors are suspended metallic gold membranes (Fig. 2) of  $75 \times 50 \mu\text{m}^2$  ( $1 \mu\text{m}$ -thick), anchored on one side on the Si-substrate (covered by a  $1 \mu\text{m}$ -thick thermally-grown  $\text{SiO}_2$  oxide). Their up-curved profile is obtained by using a stack of metals (Au/Cr/Au) with different types of built-in stress. The fabrication process is similar with that presented in Ref 16. The actuation voltage of the devices presented here is about 25 V.

Figure 3 shows the design of the entire MOEMS device, with the 8 pairs of micro-mirrors and the actuation voltage pads. The actuation of the individual micro-mirrors is realized by applying a voltage between their corresponding actuation pad and the conductive Si substrate (used as general ground for all devices and electrically isolated by the  $1 \mu\text{m}$ -thick  $\text{SiO}_2$  layer). We use only one membrane by pair at the same time (each micro-mirror has been doubled in

the design simply for avoiding to replace the entire device in the case when only one micro-mirror is damaged). As can be seen in the focused area of Fig. 3, each micro-mirror is separated from its matching neighbors by  $250\ \mu\text{m}$ , corresponding to the periodicity of the V-grooves holding and aligning the laser fibers to be combined, in front of their associated MEMS device.

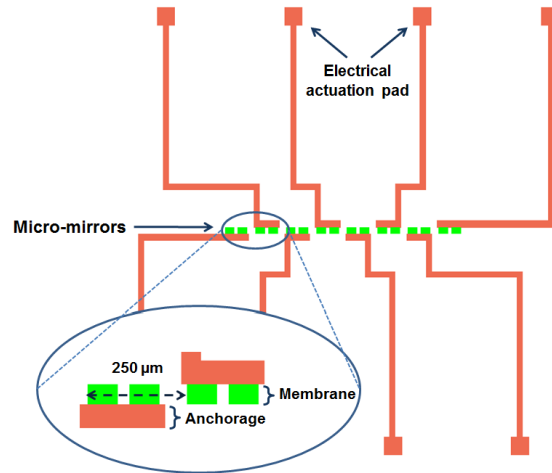


Fig. 3. Schematics of the overall MEMS device used for multiple fiber lasers Q-switching.

### 3. Experimental setup

The experimental setup for multiple fiber lasers combination is depicted on Fig. 4. To demonstrate the spectral combining principle, we used four individual fiber lasers, composed of 50 cm-long erbium-doped fiber (EDF) with a core size of  $9\ \mu\text{m}$ . These doped fibers are spliced at one side to a Fiber Bragg Grating (FBG,  $R = 50\%$ ) followed by a Wavelength Division Multiplexer (WDM) used to provide the pump power (100 mW at 976 nm for each laser). Two laser diodes (L.D. on Fig. 4) are used for core-pumping of the four fiber lasers through 2x2 couplers (not represented on Fig. 4).

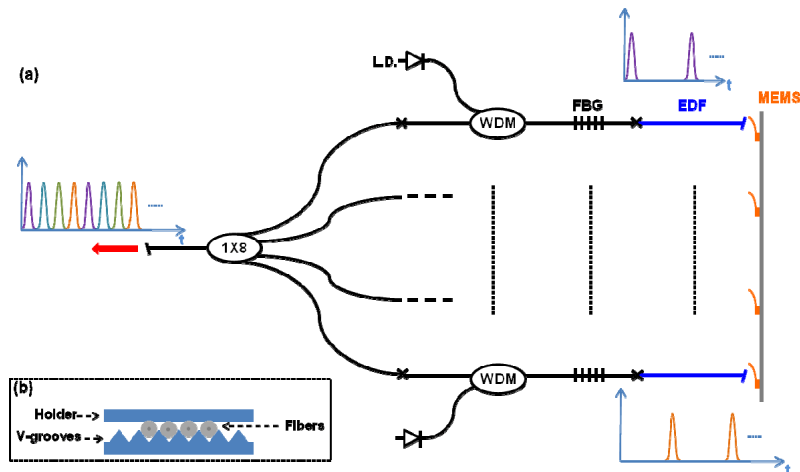


Fig. 4. (a) Experimental setup and operating principle of the overall laser system obtained by spectral combining of four Q-switched fiber lasers; (b) fiber arrangement within V-grooves for tight alignment with the MEMS micro-mirrors.

Finally, an 8x1 WDM (only four inputs are needed here) is used as an element combining the individual fiber laser emissions and provides the overall laser system output. The individual lasing wavelengths of each of the four fiber lasers are fixed by the corresponding FBGs ( $\lambda_1 = 1539.4$  nm,  $\lambda_2 = 1542.4$  nm,  $\lambda_3 = 1543.3$  nm and  $\lambda_4 = 1544.2$  nm), their bandwidths match the output WDM's ones. The 8x1 WDM output is angle-cleaved in order to avoid the Fresnel reflection. At the other side, the four free outputs of the erbium-doped fibers are placed in front of the MEMS micro-mirrors. The fiber ends are handled using silicon-machined V-grooves (Fig. 4(b)) having the same pitch as the distance between the micro-mirrors (250  $\mu\text{m}$ ). Thus, each individual fiber is placed just in front of a deformable membrane (of 75x50  $\mu\text{m}^2$ ) and is independently Q-switched by a single micro-mirror of the MEMS device. The principle of operation of a single Q-switched laser is the same as described in Ref. [8]. Accordingly, each micro-mirror can be actuated separately for synchronous or asynchronous modulation of the corresponding fiber lasers composing the global system.

#### 4. Results and discussion

A typical laser emission output from the four Q-switched fiber lasers combined using the above-mentioned experimental setup is presented on Fig. 5. On Fig. 5(a) is shown the pulse train (in red) recorded at the 8x1 WDM output, containing the four pulse trains from each separate laser. In this case, the lasers are operated in an asynchronous mode through the micro-mirrors actuation (control voltage signal waveforms equally phase-shifted between the four individual lasers). The phase shift is easily and continuously tunable by managing the individual control voltages using a waveform generator providing up to eight channel signal outputs which can be either independently controlled or generated in a master-slave configuration. The pulse duration of a single laser (operating in the Q-switching regime at 20 kHz) is less than 400 ns and the pulse energy is 25 nJ. The black curve on Fig. 5(a) represents a typical bipolar voltage signal applied to one micro-mirror. The output power of each laser depends on several parameters (the length of the doped-fiber, the splicing losses ...) but the most critical one is the positioning of the fiber end in front of the active micro-mirror. This explains the unbalanced pulse peak powers (pulse amplitudes on Fig. 5(a)) which is confirmed by the corresponding spectral distribution measured at the 8x1 WDM output and represented on Fig. 5(b). Thus, using spectral combining of four fibers lasers Q-switched at 20 kHz, we obtained a laser system providing pulse trains with repetition rates of 80 kHz representing an increase of the individual repetition rates by a factor 4, without significant pulse quality degradation.

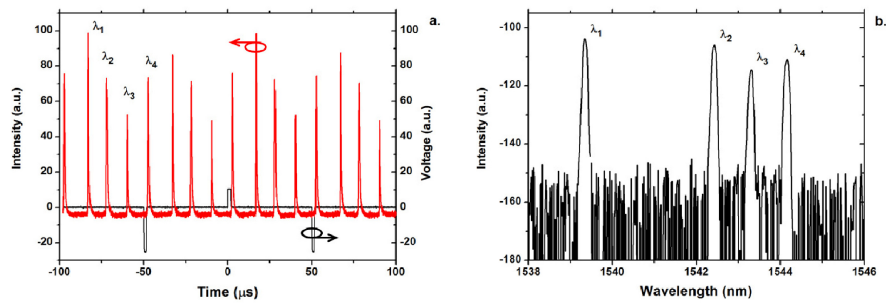


Fig. 5. (a) Temporal multiplexing of the four Q-switched lasers; in red: the overall laser system output, in black: typical applied voltage to the MEMS micro-mirrors for Q-switching the individual lasers; (b) associated spectral distribution of the overall emission.

Furthermore, the concept presented above can be highly relevant for applications requiring the ability to make temporal pulse selection or to choose pulse positions in the final pulse train. As an example, we tested the two-by-two synchronization of the individual fiber lasers.

The pulsed emission from the lasers emitting at  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$  were temporally synchronized and so the ones from the lasers emitting at  $\lambda_3$  and  $\lambda_4$ . However, the emission from the two pairs ( $\lambda_1 + \lambda_2$  and  $\lambda_3 + \lambda_4$ ) was phase-shifted using the corresponding micro-mirror's actuation. As a result, the final repetition rate of the whole system is increased by a factor of two (Fig. 6(a) and 6(b)) and each pulse peak power and pulse energy is also increased by a factor of two (since each overall pulse is the sum of the individual pulses from the laser pairs  $\lambda_1 + \lambda_2$  or  $\lambda_3 + \lambda_4$ , leading to 50 nJ per pulse).

In order to demonstrate the full capability of the combining system, on Fig. 7 are presented the experimental results corresponding to laser pulse emission obtained from two other operating modes: the perfect synchronization of the pulse trains (Fig. 7(a)) and for burst-like emission (Fig. 7(b)). In the first case, the four distinct lasers are simultaneously Q-switched (no phase shift between the micro-mirrors actuation control) leading to a pulse peak power and pulse energy increase (by a factor of four). Thus, 0.1  $\mu$ J-energy overall pulses can be obtained by incoherent combining and temporal superposition of the discrete 25 nJ pulses. The second case (Fig. 7(b)) confirms the versatility of this setup and shows that it is possible to manage precisely the relative pulsed trains' temporal positions. The precise control of the phase delay between the individual micro-mirror's actuation waveforms allows obtaining pulse packets with monitored time delays between the emitted pulses.

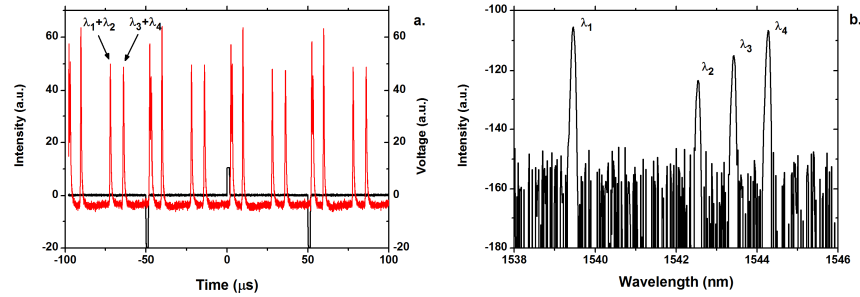


Fig. 6. (a) The overall laser system output using the 2x2 synchronization of the four Q-switched lasers (red curve) and typical actuation voltage of one micro-mirror (black curve), (b) associated spectral distribution of the overall emission.

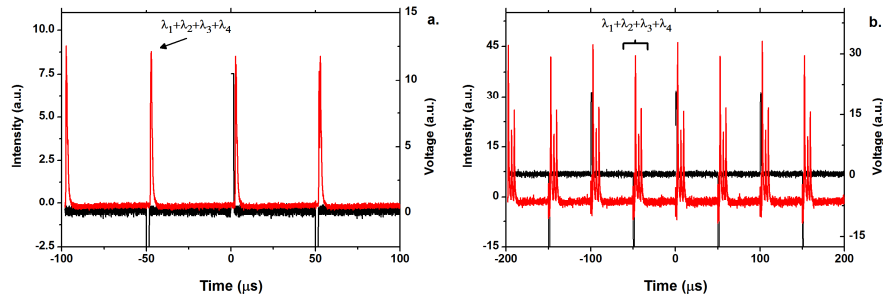


Fig. 7. (a) Laser pulses obtained using perfect synchronization of the individual pulse trains and (b) burst-type emission with monitored time delays between the emitted pulses.

## 5. Conclusion

We have demonstrated a simple laser system setup able to spectrally combine fiber lasers in order to manage their temporal overall emission. The multiple laser combination has been realized using MEMS micro-mirrors devices which play a dual function (modulator and end-cavity mirror). The overall laser system is able to provide repetition rates or pulse energies which are multiples of the corresponding values of the individual laser sources. The proof of principle demonstrated here employed four distinct fiber lasers Q-switched at 20 kHz

providing 25 nJ pulses and allowed to obtain combined laser pulse trains at 80 kHz repetition rate or higher energy per pulse (0.1  $\mu$ J), depending on the driving scheme of the discrete fiber lasers. Our approach is greatly reducing the bulkiness and the cost of the combining technique compared with alternative solutions employing acousto-optic or electro-optics modulators. The pulse duration of the system presented here (less than 400 ns), determined by the individual configuration of the laser sources, could be shortened ( $\sim$ 10 ns pulse duration has already been reached with similar micromirrors). The repetition rate and the pulse energy could be increased and scaled up likewise. The setup can be simplified by removing the FBGs which have been inserted in order to minimize power loss in the multiplexer. In this case the right-cleave of the output of the 8x1 WDM can play the role of the output coupler. The setup presented here can be easily scaled up for combining a higher number of fiber lasers (allowing an increase of both energy per pulse and frequency repetition rates), and shows a high potential for high-speed material processing applications. Furthermore, such multi-spectral lasers with pulse shape control ability can be used for implementing tunable photonic microwaves filters or for multiplexing modulated microwave subcarriers in optical communication systems [17]. Finally, the individual MEMS-based lasers within this system could also be driven in the mode-locking regime [9], providing high repetition rates and short pulses, even at very different wavelengths. These capabilities could be relevant for applications like multi-wavelength microscopy and imaging and spectroscopy.



## CONCLUSIONS

**E**n conclusion de cette partie, ***nous avons montré la possibilité d'utiliser des microéléments électromécaniques (éléments MOEMS) comme miroirs laser achromatiques déformables et leur intégration en tant que modulateurs dans des systèmes laser à fibre a permis d'obtenir une fréquence de récurrence ajustable.*** L'introduction d'éléments électromécaniques miniatures dans les sources laser à fibre permet d'obtenir un fonctionnement stable d'un l'oscillateur laser en régime déclenché et même (sous certaines conditions) en régime de modes synchronisés. Le faible coût de ces éléments et leur faible niveau d'activation (10 V-50 V) en font de bons candidats pour remplacer les modulateurs électro-optiques actuels. Des impulsions laser dans le régime des nanosecondes avec des puissances moyennes proches du Watt ont été également démontrées.

Les principales avancées et faits marquants (à l'état de l'art international) dans le cadre de cette activité de recherche sont synthétisées ci-dessous:

- ***Le développement des systèmes laser à fibre mono ou multi- longueur d'onde à déclenchement électromécanique; sommation de fréquence dans un cristal non-linéaire***

Les éléments MOEMS type "pont" ou cantilever" ont été utilisés comme miroir de fond de cavité déformable et élément modulateur pour la cavité laser pouvant engendrer en régime Q-switch des impulsions nanosecondes de forte puissance avec un taux de répétition variable à plusieurs longueurs d'onde. Cette association innovante de l'optique laser et de la micro technologie développée pour les MEMS nous a permis de réaliser, en première, un système laser à fibre dopée aux ions  $\text{Er}^{3+}$  ou  $\text{Yb}^{3+}$  couplé à un micro- miroir déformable actionné électriquement. Le système laser opère à des fréquences de récurrence continûment ajustables de 20 kHz à plus de 200 kHz et génère des impulsions nanosecondes (de 10 ns à 150 ns) avec des puissances crêtes de plusieurs Watts.

Les développements ultérieurs ont permis de réaliser la synchronisation de deux impulsions laser à différentes longueurs d'onde (1  $\mu\text{m}$  et 1.5  $\mu\text{m}$ ) grâce à une architecture laser particulière utilisant un seul composant MOEMS. Ainsi, l'introduction d'éléments non linéaires (cristal massif pour la sommation de fréquence) permet d'obtenir des émissions laser dans le visible dont la longueur d'onde est ajustable entre 627 et 637 nm. De nouveaux composants ont été développés afin d'accroître les performances de ces sources et ouvrent de nombreuses perspectives. Ainsi, les arrangements de membranes triangulaires de type cantilever peuvent être utilisées avec des faisceaux laser plus larges et pourrait être une solution pour augmenter la quantité d'énergie émise par ces sources.

- ***Sélection spectrale digitale de l'émission large bande d'une source de lumière blanche utilisant la technologie MEMS optique, pour des applications biomédicales***

Nous avons développé et mis au point un procédé et un dispositif de codage spectro- temporel pour le diagnostic cellulaire par fluorescence. Ce procédé, faisant l'objet d'un dépôt de brevet (voir ci-dessous), est basé sur l'utilisation d'une source à spectre large dont le prélèvement en parallèle de plusieurs tranches spectrales (réalisé avec un réseau des éléments MOEMS) permet, à partir d'un codage particulier, d'améliorer le diagnostic cellulaire.

- ***Première démonstration d'un laser fibré à MOEMS fonctionnant en régime de synchronisation des modes longitudinaux***

Nous avons mis en évidence la possibilité pour les composants MEMS (type cantilever ou pont) de moduler les pertes de cavités lasers à des fréquences suffisamment élevées pour atteindre le régime de synchronisation des modes longitudinaux de sources lasers fibrées.

L'architecture proposée, fonctionnant à une fréquence de récurrence de 5 MHz, génère des impulsions plutôt longues (1 ns) pour ce régime de fonctionnement. Néanmoins, nous avons pu montrer que la même cavité modulée par un modulateur acousto-optique présente des performances

similaires. Ainsi, nous avons fait la démonstration expérimentale de la capacité des composants MOEMS réalisés, à atteindre des fréquences de modulation de plusieurs mégahertz. Ceci laisse présager d'un fort potentiel pour la synchronisation des modes dans sources lasers plus courtes, dont l'optimisation des durées d'impulsions devrait permettre d'approcher les standards pour ce type de source. La réduction de la longueur de cavité devrait permettre de faciliter la gestion de la dispersion totale mais nécessite la conception de micro-miroirs ayant des fréquences de résonances élevées. Une des solutions que nous envisageons est de remplacer l'or de la couche structurale des composants utilisés ici par d'autres matériaux (Al, Si...). Par exemple, dans le cas de l'aluminium, son module d'Young est peu différent de celui de l'or (70 GPa au lieu de 78 GPa) mais sa densité est très inférieure ( $2700 \text{ kg/m}^3$  au lieu de  $19800 \text{ kg/m}^3$ ). Dans une première approximation, la fréquence de résonance mécanique obtenue pour un composant équivalent en aluminium est donc approximativement 3 fois supérieure à celle d'un composant en or de mêmes dimensions. On peut donc parfaitement envisager, en utilisant cette solution, d'accéder à des fréquences de modulations supérieures à 10 MHz.

- **Démonstration du multiplexage temporel et spectral de sources lasers à MOEMS pour un fonctionnement à haute cadence**

Nous avons réalisé un système laser arborescent en combinant plusieurs lasers à fibre déclenchés par des éléments MOEMS. En corrélant temporellement l'actionnement des dispositifs MEMS associés aux lasers déclenchés de manière individuelle (en mode synchrone ou asynchrone), à la sortie du système laser global on peut obtenir **des impulsions à haute énergie** (en additionnant l'énergie impulsionnelle des lasers individuels) ou **des hautes fréquences de récurrences par l'entrelacement temporel des pulses lasers individuels**. L'intérêt de cette combinaison était de réaliser une source laser globale à haute fréquence de récurrence et/ou à énergie par impulsions nettement supérieure à celle d'un laser individuel.

Les expériences mises en place pour la validation de ce principe ont montrées la combinaison de quatre lasers différents déclenchés (chacun d'eux fonctionnant à une fréquence de répétition 20 kHz, avec 25 nJ/ pulse) conduisant à un système laser global générant des impulsions avec un taux de répétition de 80 kHz, ou à 20 kHz mais avec une énergie par impulsion amplifiée (0.1  $\mu\text{J}$ ). Par rapport aux solutions alternatives employant des modulateurs acousto-optiques ou électro-optiques modulateurs, notre approche permet de réduire considérablement l'encombrement et le coût des techniques de combinaison spectrale. La durée des impulsions laser du système que nous avons mis en place (inférieure à 400 ns) est déterminée par la configuration individuelle des sources laser. Elle pourra par la suite être raccourcie ( $\sim 10 \text{ ns}$ ), et permettra d'améliorer fortement la fréquence de répétition et le niveau de l'énergie impulsionnelle du système laser global.

**Les étapes suivantes dans le développement de cette thématique** visent la réalisation de composants beaucoup plus rapides, permettant de diminuer encore plus les impulsions laser (inférieures à la nanoseconde), la conception des composants MOEMS avec de nouvelles fonctionnalités (mise en forme temporelle et spatiale des signaux laser ultra- brefs), l'intégration hybride dans une même cavité laser de composants MOEMS/ d'éléments absorbants saturables pour le raccourcir les impulsions laser par double effet (modulation mécanique plus effet non linéaire) ou l'incorporation des composants MOEMS dans d'autres types d'architectures laser et systèmes optiques intégrées (micro- lasers à corps solide, lasers à guide d'onde) afin d'accroître le pouvoir d'intégration et la compacité des systèmes laser miniatures.

## REFERENCES

T1 : DAVID BOUYGE « *Systèmes lasers impulsionnels compacts et dispositifs hyperfréquences accordables basés sur l'intégration de composants MEMS* » Thèse de doctorat : électronique des hautes fréquences et optoélectronique. Limoges : Université de Limoges, 2007.

Disponible sur <<http://epublications.unilim.fr/theses/2007/bouyge-david/bouyge-david.pdf>>

T2 : Marc FABERT « *Systèmes lasers intégrant des micro-miroirs déformables a base de MEMS optiques* ». Thèse de doctorat : électronique des hautes fréquences et optoélectronique. Limoges: Université de Limoges, 2010.

Disponible sur <<http://epublications.unilim.fr/theses/2010/fabert-marc/fabert-marc.pdf>>

---

[1] P. Rai-Choudhury, *MEMS and MOEMS : Technology and Applications*. Bellingham, Washington: SPIE, 2000.

[2] P. D. Dobbelaere, K. Falta, L. Fan, S. Gloeckner, and S. Patra, "Digital MEMS for Optical Switching," *IEEE Communications Magazine*, Mar. 88, 2002.

[3] C. Marxer, "Vertical Mirrors Fabricated by Deep Reactive Ion Etching for Fiber-Optic Switching Applications," *Journal Of Microelectromechanical Systems*, vol. 6, no. 3, 1997.

[4] I. W. Jung, "Single-Crystal-Silicon Continuous Membrane Deformable Mirror Array for Adaptive Optics in Space-Based Telescopes," *IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics*, vol. 13, no. 2, 2007.

[5] M.R. Douglass, "DMD reliability: A MEMS success story", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol.4980, pp. 1-11, 2003, et <http://www.dlp.com/>

[6] A. D. Aguirre, P. R. Herz, Y. Chen, J. G. Fulimoto, "Two-axis MEMS Scanning Catheter for Ultrahigh Resolution Three-dimensional and En Face Imaging", *Opt. Express*, **15**, 2445, 2007.

[7] R. Hoskinson, B. Stoeber, "High-dynamic range image projection using an auxiliary MEMS mirror array," *Opt. Express*, 16, 7361, 2008.

[8] C.J. Chang-Hasnain, J. Connie, "Tunable VCSELs", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 6, n°6, pp.978–987, 2000.

[9] K.Hsu, C.M.Miller, K.D.Choquette , Continuous wavelength tuning of 850-nm verticalcavity surface-emitting laser in Fabry-Pérot cavity", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.10, n°9, pp.1199-1201, 1998.

[10] P. Wang, P. Tayebati, D. Vakhshoori, C.-C. Lu, M. Azimi, and R. N. Sacks "Half-symmetric cavity microelectromechanically tunable vertical cavity surface emitting lasers with single spatial mode operating near 950 nm" *Appl. Phys. Lett.* **75**, 897, 1999.

[11] Y.A. Peter, H.P. Herzig, "Pulsed fiber laser using micro-electro-mechanical mirrors", *Optical Engineering*, vol. 38, n°4, pp. 636-640, 1999.

[12] M. J. F. Digonnet, *Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers*, 2<sup>nd</sup> edition, CRC Press, 2001.

[13] Y. Wang, "Actively Q-switched fiber lasers: Switching dynamics and nonlinear processes," vol. 31, pp. 131-216, 2007.

[14] B. C. Collings, "Stable multigigahertz pulse-train formation in a short-cavity passively harmonic mode-locked erbium/ytterbium fiber laser," *Optics Letters*, vol. 23, no. 2, 1998.

- [15] H. Wang, Y. Wang, W. Zhao, W. Zhang, T. Zhang, X. Hu, Z. Yang, H. Liu, K. Duan, X. Liu, C. Li, D. Shen, Z. Sui, and B. Liu, "All-fiber mode-locked nanosecond laser employing intracavity chirped fiber gratings," *Optics Express*, Vol. 18, Issue 7, pp. 7263-7268, 2010.
- [16] Y. Wang and C.-Q. Xu "Actively Q-switched fiber lasers Switching dynamics and nonlinear processes" *Prog. Quantum Electron.* vol. 31, pp.131 -216, 2007.
- [17] D. Zalvidea, N.A. Russo, R. Duchowicz, M. Delgado-Pinar, A. Díez, J.L. Cruz and M.V. Andrés, "High-repetition rate acoustic-induced Q-switched all-fiber laser," *Opt. Commun.* 244, 315-319, 2005.
- [18] J. Y. Huang, S. C. Huang, H. L. Chang, K. W. Su, Y. F. Chen, and K. F. Huang, "Passive Q switching of Er-Yb fiber laser with semiconductor saturable absorber," *Optics Express*, Vol. 16, Issue 5, pp. 3002-3007, 2008.
- [19] N. A. Russo, R. Duchowicz, J. Mora, J. L. Cruz, and M. V. Andrés, "High-efficiency Q-switched erbium fiber laser using a Bragg grating-based modulator," *Opt. Commun.* 210(3-6), 361–366, 2002.
- [20] **A. Crunteanu**, D. Bouyge, D. Sabourdy, P. Blondy, V. Couderc, L. Grossard, P.H. Pioger, A. Barthélemy, "Deformable micro-electro-mechanical mirror integration in a fibre laser Q-switch system", *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 8 (7), pp. S347-S351, 2006.
- [21] D. Bouyge, A. Crunteanu, D. Sabourdy, P. Blondy, V. Couderc, J. Lhermite, L. Grossard and A. Barthélemy, "Integration of micro-electro-mechanical deformable mirrors in doped fiber amplifiers," *Microsystems Techn.* **13**, 1607, 2006.
- [22] M. Fabert, A. Desfarges-Berthelemot, V. Kermène, A. Crunteanu, D. Bouyge and P. Blondy, "Ytterbium-doped fibre laser Q-switched by a cantilever-type micro-mirror," *Opt. Exp.*, **16**, 22064, 2008.
- [23] M. Fabert, **A. Crunteanu**, V. Kermène, A. Desfarges-Berthelemot, D. Bouyge, P. Blondy, "8 ns Pulses from a Compact Fibre Laser Q-Switched by MOEMS", *CLEO/IQEC 2009 Baltimore, Maryland, USA*, May 31-June 5, 2009.
- [24] D. Bouyge, **A. Crunteanu**, V. Couderc, D. Sabourdy, P. Blondy, "Synchronized tunable Q-switched fiber lasers using deformable achromatic microelectromechanical mirror", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.20, n°12, pp.991-993, 2008.
- [25] D. Bouyge, C. Buy, **A. Crunteanu**, V. Couderc, P. Leproux, P. Blondy, "Discrete spectral selection and wavelength encoding from a visible continuum using optical MEMS", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18, article no. 065010, 2008.
- [26] V. Couderc, C. Lesvigne, P. Leproux, D. Bouyge, **A. Crunteanu**; « Procédé et dispositif de caractérisation d'éléments microscopiques » brevet FR déposé le 10 octobre 2007 ; N° 07/07098, avec une extension aux pays PCT sous le titre: « Method and device for characterizing microscopic elements », WO2009/087287 du 16.07.2009, et des demandes en cours au Japon et aux USA.
- [27] M. Fabert, V. Kermene, A. Desfarges-Berthelemot, P. Blondy, **A. Crunteanu**, "Actively mode-locked fiber laser using a deformable micromirror", *Optics Letters* 36, 2191, 2011.
- [28] M. Fabert, A. Desfarges-Berthelemot, V. Kermène, and **A. Crunteanu**, "Temporal synchronization and spectral combining of pulses from fiber lasers Q-switched by independent MEMS micro-mirrors", *Optics Express*, Vol. 20, Issue 20, pp. 22895-22901, 2012.
- [29] O. Schmidt, T. V. Andersen, J. Limpert, and A. Tünnermann, "187 W, 3.7 mJ from spectrally combined pulsed 2 ns fiber amplifiers". *Optics Letters*, Vol. 34, Issue 3, pp. 226-228, 2009.

## CHAPITRE 2.

### DISPOSITIFS INNOVANTS POUR LA MICROELECTRONIQUE ET L'OPTIQUE INTEGRANT DES MATERIAUX A TRANSITION DE PHASE ISOLANT-METAL ( $\text{VO}_2$ )

L'intérêt croissant des recherches dans le domaine des circuits et dispositifs reconfigurables pour les fréquences RF/ les micro-ondes émane de leur haut potentiel d'intégration dans des systèmes de communications avancés pour des applications civiles, pour la défense ou pour le spatial (systèmes de communications à multiples fréquences, antennes reconfigurables/ commutables etc.). Les technologies actuelles visent le développement de dispositifs accordables pour faire face à la multiplication incessante des standards et fréquences de communications (cellulaire, transmission de données sans fil, radar, etc.). Généralement, la reconfiguration de ces systèmes de communication complexes est réalisée à l'aide de composants électroniques actifs (semi-conducteurs à base de diodes ou transistors) [1] ou plus récemment, en utilisant des solutions incluant des MEMS RF (Micro-Electro-Mechanical Systems) [2]. Cependant, les performances de ces dispositifs sont souvent limitées par la consommation d'énergie et le comportement non linéaire des composants semi-conducteurs ou par la fiabilité (néanmoins en cours d'amélioration) des dispositifs MEMS (de type commutateur ou condensateur variable).

Les matériaux intelligents, facilement intégrables, peuvent être une solution viable pour la réalisation de dispositifs électroniques et / ou des modules optiques pour obtenir des meilleures performances, des vitesses de fonctionnement plus élevées. Ces matériaux intelligents possèdent des propriétés électriques et optiques- résistivité et permittivité électrique, indice de réfraction, etc., qui peuvent être commandées et ajustées par des stimuli externes (application d'un champ électrique, d'un courant/ tension et de contraintes mécaniques/ pression, injection de porteurs –, radiation optique incidente, variation de la température, etc.). Dans le domaine des fréquences RF-micro-ondes, les matériaux pertinents pour la fabrication de composants accordables (résistances, condensateurs, inductances), peuvent être classés (dans une première approche) en fonction de leurs propriétés accordables: matériaux à résistivité accordable (semi-conducteurs, les matériaux à changement de phase), matériaux à permittivité accordable (ferroélectriques, cristaux liquides, pyrochlores, multi-ferriques) ou matériaux à perméabilité accordable (ferromagnétiques, multi-ferriques) [3]. Ils peuvent être utilisés pour réaliser des composants innovants pour une large gamme d'applications: déphaseurs / modulateurs, lignes à retard, commutateurs, filtres et réseaux d'adaptation, charges variables, antennes agiles ou encore capteurs de température, pression, ou d'autres grandeurs physiques etc.

Actuellement, les matériaux intelligents font l'objet de beaucoup d'attention de la part de la communauté scientifique à cause de leurs caractères évolutifs et adaptatifs qui font d'eux des candidats potentiels pour de nombreuses applications (transmission de l'information, optoélectronique, matériaux artificiels).

Parmi les matériaux intelligents (dans le sens mentionné ci-dessus) étudiés actuellement, une catégorie très intéressante présente une transition de phase ou une transition métal-isolant (MIT ou Metal- Insulator Transition). Le domaine de recherche associé (au niveau fondamental mais aussi applicatif) couvre une multitude de systèmes et de matériaux : chalcogénures, manganites à magnétorésistance colossale, supraconducteurs à base d'oxydes de Cu, ferroélectriques, oxydes de Ni, Fe etc.) [4, 5]. En particulier, la famille des oxydes de vanadium ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{V}_2\text{O}_3$ ,  $\text{VO}_2$ ) [6, 7], montre les meilleures performances quant à la variation de leurs propriétés électriques et optiques lors de la transition MIT (changement notable de résistivité électrique et indice de réfraction entre les deux phases) (Figure 2.1). Dans cette famille, le dioxyde de vanadium ( $\text{VO}_2$ ) a été étudié activement dans la dernière décennie en raison de son changement abrupt et réversible de ses propriétés, à une température proche de la température ambiante ( $-68^\circ\text{C}$  ou  $340\text{K}$ ) [8]. Ces propriétés remarquables en font un candidat potentiel viable pour introduire des fonctionnalités avancées dans les dispositifs RF-micro-ondes. De plus, le  $\text{VO}_2$  possède une forte résistance aux champs électriques, ce qui le rend



particulièrement attractif pour la commutation ultra-rapide et la transmission de puissance dans les dispositifs micro-ondes.

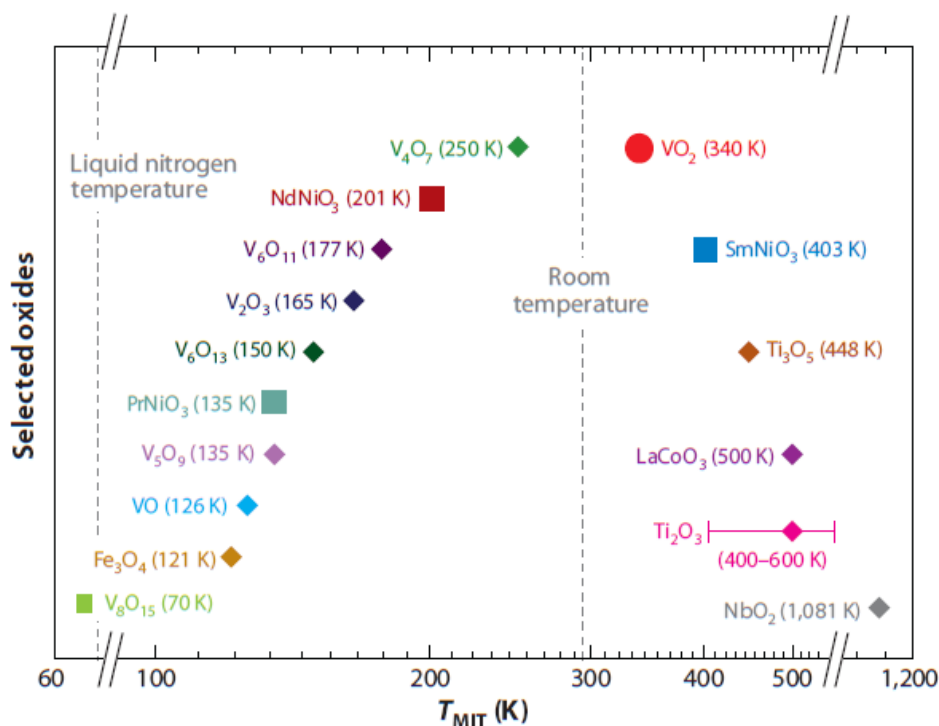


Figure 2.1. Les températures de la transition MIT pour une sélection de certains oxydes sous forme massive. Les contraintes externes ou générées par le type de substrat ou le dopage peuvent influencer de façon significative la température de transition et la variation de résistivité pour les matériaux en couche mince [7].

Dans ce chapitre, nous offrirons un aperçu des étonnantes caractéristiques du matériau  $VO_2$  en couche mince en se concentrant sur ses propriétés électriques et optiques. Des exemples concrets de son intégration dans des dispositifs avancés agiles dans le domaine RF-micro-ondes, développés dans les dernières années au laboratoire XLIM seront également donnés.

*Cette activité de recherche interdisciplinaire est menée en collaboration avec le laboratoire SPCTS UMR CNRS 7315. Elle a bénéficié du support de l'ANR dans le cadre d'un projet Jeune Chercheur dont j'étais le responsable (ADMOS-VO2 : "Advanced microwave and optical switching devices based on reversible Metal-Insulator Transition in  $VO_2$  thin films", ANR-07-JCJC-0047, 2007-2011, PI- A. Crunteanu) et bénéficie du soutien du laboratoire XLIM (financement à travers les appels internes amont Projets XLIM- Carnot 2008 et 2010 et 2013) et de la région Limousin (projet XLIM-SPCTS « Composites nano-structurés intelligents à propriétés commandables pour des applications électroniques et optiques avancées » – 2011–2013).*

Les résultats de recherche présentés ci-dessous ont été également obtenus dans le cadre de plusieurs thèses co-encadrées dans le département XLIM-Minacom et en collaboration avec le laboratoire SPCTS :

- Thèse de Julien Givernaud sur "L'étude, la fabrication et la conception des circuits et dispositifs micro-ondes et optiques à base des matériaux intelligents type  $VO_2$ " (2007- 2010) soutenue le 26 mars 2010.
- Thèse de Jonathan Leroy sur les "Composants et dispositifs accordables pour la microélectronique et l'optique à base de matériaux intelligents à transition de phase", commencée en octobre 2010, soutenance prévue octobre 2013. Cette thèse est cofinancée



par la Fondation EADS dans le cadre du projet « Métamatériaux dans le domaine THz basés sur la réponse non-linéaire des matériaux à transition de phase » (2011-2013).

- Thèse de Amine Mennai, sur les « Dispositifs avancés à l'échelle micro-et nano-métrique pour des applications type nano-oscillateurs à mémoire et «mémoires résistives» (Memristors) », 2012-2014, en cours.

## 2.1 LA TRANSITION DE PHASE ISOLANT-MÉTAL (MIT) DU DIOXYDE DE VANADIUM (VO<sub>2</sub>) : UNE DIRECTION PROMETTEUSE VERS DES DISPOSITIFS ET SYSTEMES ACCORDABLES BASSES ET HAUTES FREQUENCES

L'objectif principal et initial des recherches développées dans le cadre du projet ADMOS-VO<sub>2</sub> était de réaliser de **nouveaux types des commutateurs ultrarapides fonctionnant dans les domaines RF -micro-ondes et optique** en utilisant des **matériaux présentant une transition réversible semi-conducteur- métal (ou MIT- Metal- insulator transition)**. Il a également été possible d'évaluer la capacité de ce type de matériaux à réaliser des fonctions de commutations permettant de pallier certains problèmes actuels rencontrés dans les systèmes de communications (gestion de l'énergie, puissance, rapidité, intégration).

Le fonctionnement des composants réalisés au cours de ce projet est basé sur la transition réversible MIT des couches minces de VO<sub>2</sub>, **transition ultra-rapide** (< ps) qui est accompagnée par une **modification abrupte et drastique de ces propriétés électriques et optiques**. Cette transition réversible isolant/métal (MIT) peut être déclenchée thermiquement [8, 9], électriquement [10, 11, 12], optiquement [13,14] ou même sous l'effet de pression ou de contraintes externes [15]. A température ambiante, le VO<sub>2</sub> se comporte comme un isolant avec une structure cristalline monoclinique mais au-dessus de 68°C (température de transition), le matériau se transforme brutalement et acquiert le comportement d'un métal avec une structure tétragonale rutile. Lors de la transition MIT la résistivité électrique varie de 3 à 5 ordres de grandeurs et la réflectivité optique augmente de manière significative [13, 14]. Ces propriétés remarquables peuvent être utilisées pour réaliser des commutateurs électriques ou micro-ondes, composants élémentaires, pour la conception de dispositifs complexes micro-ondes reconfigurables [16, 19]. Dans ce cadre, l'activation électrique du VO<sub>2</sub> (configuration à deux ou trois-terminaux) est favorisée par rapport à l'activation thermique car les temps de commutation sont plus rapides et l'implémentation est plus facile.

Bien que de nombreuses études théoriques et expérimentales aient été consacrées à la compréhension de la transition de phase MIT dans le VO<sub>2</sub>, il n'y a toujours pas de consensus concernant les mécanismes physiques qui entrent en jeu [9, 13, 20, 21]. Les deux mécanismes retenus (le mécanisme thermique de Peierls- interactions électron-phonon induisant un changement de structure cristalline et la transition de Mott-Hubard - interactions fortes des électrons corrélés) sont encore des éléments de débat [4, 8, 10, 12, 14]. La température de transition MIT des films de VO<sub>2</sub> peut être décalée vers des températures plus basses, par exemple en appliquant un champ électrique ou un faisceau de lumière incidente à un dispositif à deux terminaux [11, 22, 23]. En effet, ces stimuli influent sur les concentrations de porteurs conduisant à un changement de la température de transition. Selon le mécanisme de Mott-Hubard [20], la transition MIT devrait être initiée par l'augmentation de la concentration d'électrons (une fois que les électrons atteignent une concentration critique, le matériau VO<sub>2</sub> passe d'un état semi-conducteurs à un état métallique). Ainsi, la température de transition peut être augmentée ou diminuée en dopant le VO<sub>2</sub> avec des métaux comme le W, Cr, Ta ou Al [24, 25].

La possibilité d'activer la transition MIT dans les couches minces de VO<sub>2</sub> à l'aide d'une commande externe a ouvert un vaste champ d'applications. On peut citer leur introduction dans des micro-bolomètres [26, 27], des fenêtres thermo chromiques intelligentes [28], leur utilisation comme modulateurs spatiaux de lumière [29-31] ou comme des commutateurs électriques à deux et trois terminaux [10, 11, 18, 19, 21, 32]. Cependant, le fonctionnement des dispositifs ainsi proposés repose principalement sur l'activation thermique de la transition MIT qui est beaucoup plus lente que celle initiée électriquement ou optiquement (injection massive de charges ou de photons). Les rares études

concernant l'intégration possible de films minces de  $\text{VO}_2$  dans les dispositifs et systèmes dans le domaine RF et micro-ondes visent la caractérisation de leurs propriétés diélectriques [17], la fabrication de modulateurs et de polariseurs micro-ondes [33], la réalisation de commutateurs micro-ondes coplanaires à commande thermique [16, 18, 19] ou encore les simulations numériques de la commutation du  $\text{VO}_2$  [34]. La fréquence maximale de fonctionnement des commutateurs à base de  $\text{VO}_2$  a été estimée au-delà de 1 THz [10], ce qui les rend très attractifs pour la réalisation de dispositifs à large bande dans les domaines de fréquences DC/ RF/micro-ondes et optiques, en passant par le domaine THz.

Plusieurs méthodes de dépôt ont été proposées pour la fabrication de films minces de  $\text{VO}_2$ : la pulvérisation à magnétron DC ou RF, l'ablation laser, les techniques d'évaporation thermique ou encore de techniques de type sol-gel [17, 18, 27, 32, 36 etc.]. La multivalence de l'ion de vanadium et sa structure complexe [35] impliquent l'existence de nombreuses phases avec des stœchiométries proche du  $\text{VO}_2$ . La synthèse de phase pure de  $\text{VO}_2$  sous forme de films minces est donc un défi important. Ainsi l'optimisation minutieuse des paramètres expérimentaux de dépôts est absolument nécessaire pour obtenir des films minces de  $\text{VO}_2$  stœchiométriques et stabilisés sans post-traitement.

## COUCHES MINCES DE $\text{VO}_2$ OBTENUS PAR ABLATION LASER REACTIVE [18]

**N**ous avons réalisé des dépôts de films minces de  $\text{VO}_2$  en utilisant deux méthodes : l'ablation laser réactive (PLD ou Pulsed Laser Deposition), en collaboration avec le laboratoire SPCTS et l'évaporation par faisceau d'électrons assisté ou non par une décharge RF, au sein de la plateforme PLATINOM du laboratoire XLIM. Dans le cas de l'ablation laser, les films de  $\text{VO}_2$  ont été déposés à partir d'une cible métallique de vanadium à haut degré de pureté (99,95%) sous une atmosphère d'oxygène. Le dispositif expérimental [18] est basé sur un laser excimer KrF (à une longueur d'onde de 248 nm et une durée d'impulsion de 25 ns) opérant à une fréquence de répétition de 10 Hz. Le faisceau laser est focalisé sur la cible de vanadium en rotation afin d'obtenir des fluences (énergie par unité de surface irradiée) de l'ordre de 5 à 9 J / cm<sup>2</sup>. Le panache de plasma ainsi obtenu se dilate dans l'atmosphère ambiante d'oxygène (pression totale dans la chambre maintenue autour 2 × 10<sup>-2</sup> mbar) permettant d'obtenir des couches minces sur un substrat chauffé situé en vis-à-vis. Le substrat, le plus couramment utilisé, est le saphir orienté c ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  (c) monocristallin) car il présente le plus faible décalage de maille cristalline par rapport à la phase monoclinique du  $\text{VO}_2$ . Il permet ainsi d'obtenir des films mono-orientés [36]. Pendant le dépôt, le substrat est maintenu à une température d'environ 500 °C. La variation de la durée des dépôts entre 10 et 45 minutes permet d'obtenir des films avec des épaisseurs comprises entre 100 et 600 nm. Nous avons également réalisé des dépôts de  $\text{VO}_2$  sur saphir de type R,  $\text{SiO}_2$  ou Si, mais les caractéristiques électriques des couches sont inférieures à celles déposés sur saphir type c (nette diminution de l'amplitude de variation de la résistivité entre les états isolant et métallique lors de la transition MIT). Quel que soit le type de substrat que nous avons utilisé, les films obtenus présentent une surface lisse. Leur morphologie (telle que révélée par microscopie à force atomique- AFM, Figure 2.2) est fait apparaître des cristallites quasi-sphériques compactes avec des dimensions typiques (rms) comprises entre 5 et 15 nm. Les analyses par diffraction de rayons X (en configuration  $\theta - 2\theta$ ) effectuées sur les films minces obtenus révèlent des raies de diffraction correspondant aux orientations (020) et (040) de la phase monoclinique  $\text{VO}_2$ .

## Topography - AFM

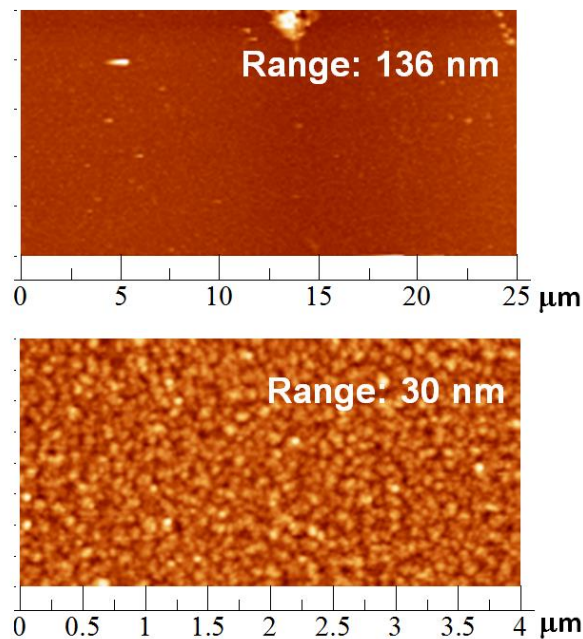


Figure 2.2. Images par AFM d'un film de VO<sub>2</sub> (épaisseur ~100 nm) obtenu par PLD sur un substrat de saphir c montrant une morphologie granulaire compacte.

### DEPOTS PAR EVAPORATION THERMIQUE A FAISCEAU D'ELECTRONS [37]

Dans le cas des dépôts de films de VO<sub>2</sub> par évaporation thermique [37] nous utilisons une installation de dépôts à faisceau d'électrons prévue avec trois canons (nous utilisons un seul canon parmi les trois disponibles). Une cible de vanadium pure disposée dans un creuset en graphite sous le support des substrats est évaporée par le faisceau d'électrons incidents (à une tension d'accélération de 10 kV) sous une atmosphère d'oxygène pure (pression totale autour de  $8 \times 10^{-2}$  Pa). Les films ont été déposés sur des substrats chauffée (à 500°C) de saphir type c ( $20 \times 20$  mm<sup>2</sup>, épaisseur 500 μm) situés à environ 230 mm au-dessus de la source de vanadium. Pendant le dépôt, les substrats sont également polarisés en utilisant un générateur RF avec une puissance incidente entre 30 et 50 W pour améliorer, à leur surface, les réactions entre les particules d'oxygène excitées et le matériau évaporé. Au cours de la croissance du film, le bombardement ionique permet également d'augmenter l'adhérence et de diminuer la porosité des films formés. La vitesse de dépôt est contrôlée par un oscillateur à quartz (fixée typiquement à 0.05 nm/s).

Ainsi, nous avons obtenu des films de VO<sub>2</sub> cristallins de haute qualité, d'épaisseurs comprises entre 15 et 250 nm, très homogènes, même sur des substrats de grande surface (Figure 2.3). Les couches de VO<sub>2</sub> réalisées dans les conditions expérimentales ainsi optimisées présentent une transition de phase isolant- métal très prononcée autour de 68 °C avec une amplitude de la variation de la résistivité électrique entre les deux états de l'ordre de  $10^4$ .

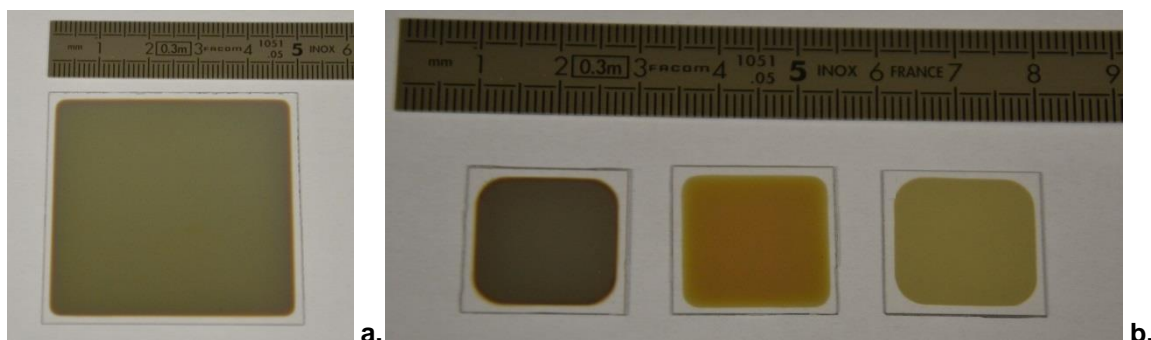


Figure 2.3. Photographies de couches minces de VO<sub>2</sub> obtenues par évaporation à faisceau d'électrons sur substrats de saphir c: **a.** couche très uniforme de 100 nm sur substrat de grandes dimensions (50 x 50 mm<sup>2</sup>) et **b.** films de VO<sub>2</sub> avec des épaisseurs différentes (100, 50 et 25 nm, de gauche à droite).

## CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES ET OPTIQUES DE COUCHES MINCES DE VO<sub>2</sub>

Les films de VO<sub>2</sub> ainsi obtenus ont été caractérisés électriquement et optiquement en enregistrant la variation de leur résistivité électrique (utilisant la méthode quatre pointes) et de leur transmission optique (spectroscopie UV-vis-IR) en fonction de la température sur une plage comprise entre 20 et 100 °C à l'aide d'un dispositif chauffant Peltier. Des cycles typiques d'hystérésis pour la résistivité et pour la transmission optique à 1600 nm (résistivité et transmission des films enregistrées pendant un cycle de chauffage-refroidissement) sont représentés sur la Figure 2.4 (a. et b. respectivement) pour une couche de VO<sub>2</sub> de 200 nm d'épaisseur obtenue par PLD sur un substrat de saphir c. On remarque un changement important de résistivité ( $> 10^4$ ) lors de la transition MIT du film. La largeur de la courbe d'hystérésis est très faible, témoignant d'une bonne qualité du matériau déposé et de la présence majoritaire de la phase VO<sub>2</sub>.

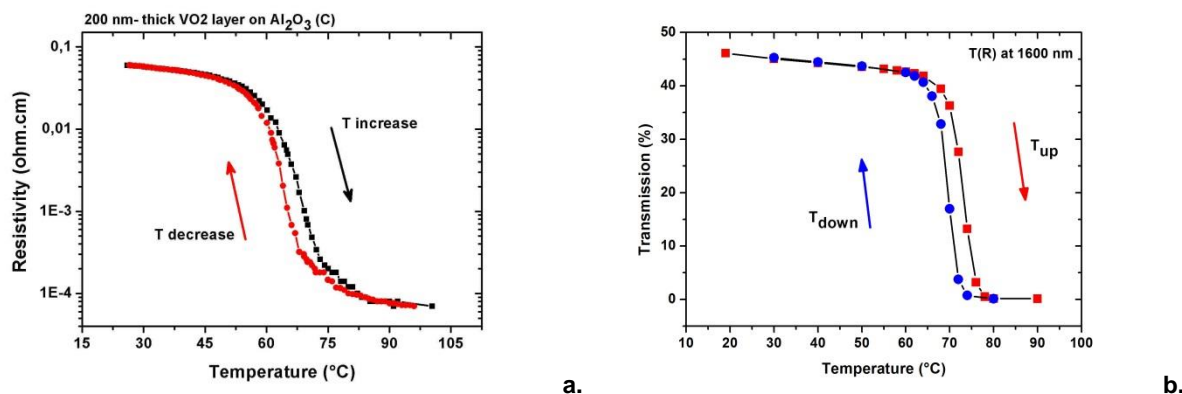


Figure 2.4. Variation typique en fonction de la température de la résistivité (a.) et de la transmission optique à 1600 nm (b) pour un film mince de VO<sub>2</sub> (200 nm) sur un substrat de saphir c.

Pour mieux comprendre l'étendue de la transition MIT du VO<sub>2</sub> et étudier ses propriétés large bande, nous avons réalisé une étude sur son ampleur et ses caractéristiques dans différentes plages de fréquences, du DC aux fréquences Téra-hertz (THz), en passant par le domaine RF-micro-ondes.

Pour cette étude, nous utilisons un film mince de VO<sub>2</sub> de 120 nm d'épaisseur déposé par ablation laser réactive [18], sur un substrat de saphir c de 500 µm d'épaisseur. Des mesures sont ensuite réalisées dans trois gammes de fréquences : DC, 75- 110 GHz et 0.2-1.4 THz. Dans le domaine DC, la conductivité du film est mesurée par la technique de mesure en quatre pointes. Dans les deux autres domaines fréquentiels, l'amplitude de la transition du matériau est quantifiée à l'aide de la transmission normalisée de l'échantillon.

Pour la plage de fréquences allant de 75 à 110GHz, la mesure est effectuée en utilisant le banc de mesures hyperfréquences représenté sur la Figure 2.5. Il est composé d'une paire de convertisseurs millimétriques HPW85104A équipés d'une sortie en guide WR 10 et reliés à un analyseur de réseau vectoriel de type HP8510C. Les mesures réalisées en espace libre permettent d'avoir accès notamment aux paramètres  $S_{21}$  et  $S_{11}$  que nous considérons équivalents, respectivement, à la transmission et à la réflexion de l'échantillon sous test.

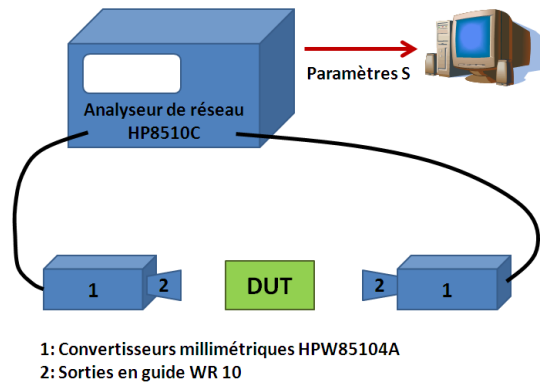


Figure 2.5. Schéma du banc de mesure hyperfréquence utilisé dans la gamme de fréquences 75-110 GHz.

Pour les fréquences allant de 0.2 à 1.4 THz, la transmission à travers l'échantillon couche mince de  $\text{VO}_2$  est déterminée à l'aide d'un banc de spectroscopie térahertz dans le domaine temporel (THz-TDS) [38] dont un schéma est représenté sur la Figure 2.6. A l'issue de la mesure, nous obtenons un signal dans le domaine temporel mais qui contient à la fois des informations en amplitude et en phase sur la transmission de l'échantillon. A partir du signal temporel, en utilisant une simple transformation rapide de Fourier (Fast Fourier Transform- FFT), nous pouvons déterminer la transmission fréquentielle de l'échantillon sous test en module et en phase.

### THz setup

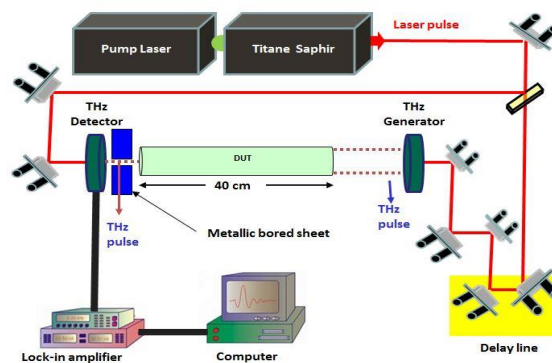


Figure 2.6. Schéma de principe du banc de mesure de spectroscopie THz dans le domaine temporel (THz-TDS).

Pour les deux gammes de fréquences, la transmission normalisée est obtenue en faisant le rapport de la transmission de l'échantillon complet (substrat + films de  $\text{VO}_2$ ) par rapport à la transmission du substrat seul. Quant au contrôle en température, il est assuré, pour les trois méthodes, en montant l'échantillon sur un élément Peltier prévu avec une ouverture en son centre pour laisser passer l'onde incidente dans le cas de l'étude à 75- 110 GHz et de 0.2 à 1.4 THz.

## CONDUCTIVITÉ DC



Sur la Figure 2.7 est représentée la conductivité du film de  $\text{VO}_2$  en fonction de la température. La conductivité est faible à 25°C (inférieure à  $100 \text{ S.m}^{-1}$ ). Une telle valeur est caractéristique d'un état isolant ou, plus exactement, d'un semi-conducteur. Lorsque la température augmente, la conductivité augmente jusqu'à environ 72°C. A cette température, le  $\text{VO}_2$  subit la transition MIT (induite par la température) et bascule de l'état isolant à l'état métallique, ce qui provoque une augmentation brutale et importante de sa conductivité. Ainsi, à 95°C, la conductivité est beaucoup plus importante de l'ordre de  $10^6 \text{ S.m}^{-1}$ . Entre 25 et 95°C, la conductivité a augmenté de près  $10^4$  ordres de grandeurs. Lorsque la température diminue, on observe le phénomène inverse avec une diminution forte et brutale de la conductivité, montrant que la transition est réversible. Dans cette deuxième partie du cycle, on observe un effet d'hystérésis car la température où l'on retrouve un comportement isolant a légèrement diminué en passant à 70°C.

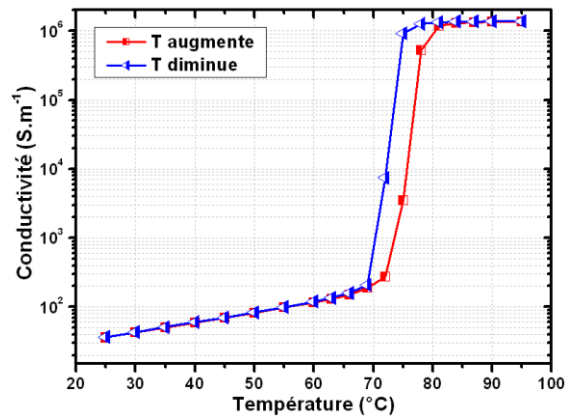


Figure 2.7. Evolution de la conductivité DC du film de  $\text{VO}_2$  en fonction de la température.

## TRANSMISSION AUTOUR DE 100 GHZ

La Figure 2.8.a montre la transmission normalisée du même film de  $\text{VO}_2$  à 25 et 95°C entre 75 et 110 GHz et le cycle d'hystérésis associé à 100 GHz (sur la Figure 2.8.b). A température ambiante, la transmission présente des valeurs autour de 0 dB ce qui correspond à l'état isolant du  $\text{VO}_2$ . Mais à 95°C, la transmission est aux alentours de - 25 dB ce qui confirme le passage vers un état métallique. Ainsi, la transition MIT du  $\text{VO}_2$  pourrait être utilisée pour réaliser une fonction de type commutateur dans cette gamme de fréquences, comme nous l'avons déjà montré dans la gamme de fréquences 100 MHz- 40 GHz [18, 19]. Le graphique sur la Figure 2.8.b qui représente le cycle d'hystérésis à 100 GHz, nous permet, quant à lui, de mettre en évidence une diminution de la température de transition par rapport aux mesures DC. En effet, celle-ci passe de 72 à 70°C lorsque la température augmente. Dans cette gamme de fréquences, le banc de mesures utilisé nous permet également d'extraire des informations sur la réflexion du matériau à travers le paramètre  $S_{11}$ . Cette étude n'étant pas réalisée en guide d'onde mais en espace libre, les résultats sont à prendre de manière qualitative car l'onde réfléchie n'est pas forcément totalement récupérée par l'antenne cornet.



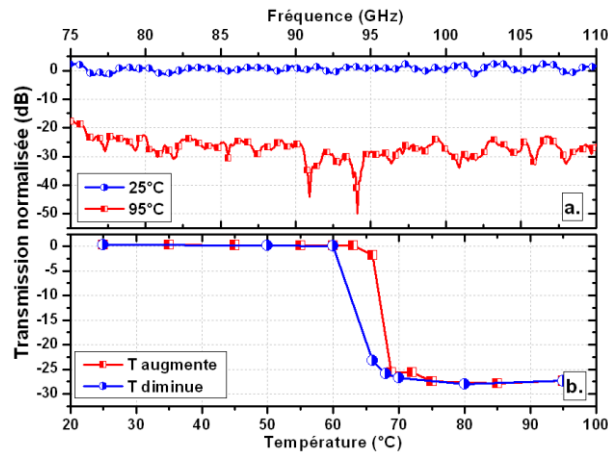


Figure 2.8. a. Mesure de la transmission du film de  $\text{VO}_2$  à 25 et 95°C dans la plage de fréquences 75-110 GHz et b. cycle d'hystérésis associé à 100 GHz.

### TRANSMISSION NORMALISÉE SUR LA GAMME DE FRÉQUENCES 0.2- 1.4 THZ

Les observations en transmission faites dans la précédente plage de fréquences étudiée ont été confirmées par les mesures effectuées aux fréquences THz, représentées sur la Figure 2.9. On retrouve le même comportement que précédemment, notamment la diminution de l'ordre de 25 dB entre 25°C et 95°C qui correspond au passage de l'état isolant à l'état métallique de la couche de  $\text{VO}_2$ . Plus intéressant encore, nous observons que la température de transition MIT a encore diminué en passant à environ 65°C. La Figure 2.9.b qui présente le cycle d'hystérésis à 1 THz, montre, néanmoins, une différence avec les mesures à 100 GHz. On constate que le cycle d'hystérésis s'est totalement refermé. Ainsi, il semblerait que les effets d'hystérésis dans le  $\text{VO}_2$  semblent être moins importants lorsque l'on travaille à des fréquences plus élevées. Enfin, on peut remarquer (comme pour la plage de fréquences 75- 110 GHz) le fait que la transmission présente, à certaines fréquences, des valeurs légèrement positives lorsque le  $\text{VO}_2$  est à l'état isolant. Ces valeurs sont, en réalité, dues à la faible épaisseur du film de  $\text{VO}_2$  qui vient s'ajouter aux incertitudes de mesures résultant d'un manque de précision du banc de mesures.

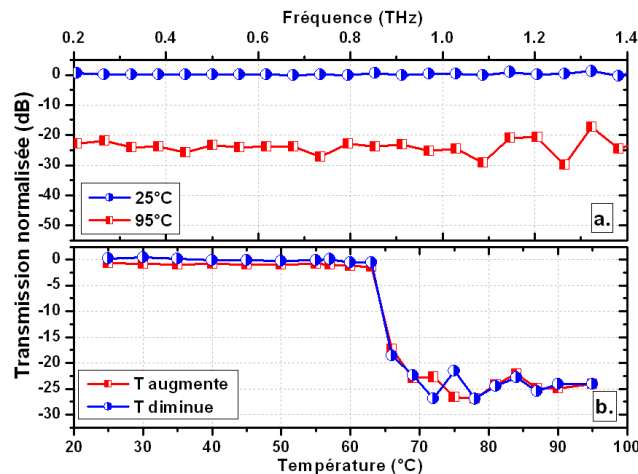


Figure 2.9. a. Mesure de la transmission du film de  $\text{VO}_2$  à 25°C et à 95°C dans la plage de fréquences 0.2-1.4 THz et b. cycle d'hystérésis associé à 1 THz.

En brève conclusion de cette partie, nous avons mis évidence le caractère très large bande de la transition isolant/métal MIT du  $\text{VO}_2$ , dans trois domaines de fréquences, du DC au THz qui s'ajoutent aux observations précédentes dans le domaine optique. L'utilisation de la transition MIT du  $\text{VO}_2$  dans toutes ces gammes de fréquences sera donc très intéressante pour des applications de commutation, modulation ou limitation des ondes électromagnétiques incidentes.



# Structural, electrical and optical properties of thermochromic VO<sub>2</sub> thin films obtained by reactive electron beam evaporation

J. Leroy, A. Bessaudou\*, F. Cosset, A. Crunteanu

XLIM UMR 6172, CNRS/Université de Limoges, 123 Avenue Albert Thomas 87060 Limoges Cedex, France

## ARTICLE INFO

Available online 16 August 2011

### Keywords:

Physical vapor deposition  
Vanadium dioxide  
Thin films  
Metal–insulator transition  
X-rays diffraction  
Electrical resistivity  
Optical transmission

## ABSTRACT

We present the structural and physical characterization of vanadium dioxide (VO<sub>2</sub>) thin films prepared by reactive electron beam evaporation from a vanadium target under oxygen atmosphere. We correlate the experimental parameters (substrate temperature, oxygen flow) with the films structural properties under a radiofrequency incident power fixed to 50 W. Most of the obtained layers exhibit monoclinic structures matching that of the monoclinic VO<sub>2</sub> phase. The temperature dependence of the electrical resistivity and optical transmission for the obtained films show that they present thermoelectric and thermochromic properties, with a phase transition temperature around 68 °C. The results show that for specific experimental conditions the VO<sub>2</sub> layers exhibit sharp changes in electrical and optical properties across the phase transition.

© 2011 Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

Vanadium dioxide (VO<sub>2</sub>) is a metal–insulator phase transition (MIT) material which shows a reversible temperature-driven structural phase transition near  $t_{MIT} = 68$  °C from an insulating state (monoclinic structure at temperatures below 68 °C) to a metallic one (tetragonal structure above  $t_{MIT}$ ) [1]. Moreover, the MIT in VO<sub>2</sub> thin films can be triggered very fast (below nanosecond scale) in different manners: electrically, optically and even under the effect of pressure or strain [2–5]. These striking properties make the material highly interesting for applications in oxide-based electronics or sensing devices [6–10]. Various deposition techniques have been employed to grow high quality VO<sub>2</sub> thin films such as pulsed laser deposition [11], reactive ion beam sputtering, magnetron sputtering [12,13] and reactive evaporation [14]. In this paper, we present the realization of high quality VO<sub>2</sub> thin films obtained using electron beam evaporation of a vanadium target under oxygen atmosphere and their structural, electrical and optical characterization.

## 2. Experimental

The film deposition was performed inside a high-vacuum electron-beam deposition chamber evacuated below  $10^{-4}$  Pa prior to each experiment. A vanadium target placed in a crucible under the substrate holder is evaporated by an incident electron beam (at an accelerating voltage of 10 kV) under pure oxygen atmosphere (total

pressure around  $8 \times 10^{-2}$  Pa). The films were grown on heated c-type sapphire substrates ( $20 \times 20$  mm<sup>2</sup>, 500 μm thick) located 235 mm above the vanadium source and polarized using a radiofrequency generator with the incident power fixed to 50 W for enhancing reactions between excited particles and evaporated material at the substrate surface. Furthermore, during the film growth the ion bombardment increases adhesion and decreases porosity of the forming films. The deposition rate of the vanadium oxide films was controlled by a quartz oscillator.

The structural properties of the obtained thin films have been investigated by X-ray diffraction (XRD) using a Bruker D8 diffractometer (Cu Kα<sub>1</sub> radiation, equipped with a Ge monochromator and a high-speed “Lynxeye” detector) in a standard  $\theta/2\theta$  setup.

The electrical resistivity variation with temperature of the obtained films has been measured using the four probes technique and a Peltier element for controlling the film's temperatures. We used a home-made set-up employing 4 in-line spring-loaded electrical probes (equally spaced by 1 mm) coupled to a Keithley 2612A sourcemeter.

The thermochromic properties of the deposited films have been analyzed using a fiber-probe thin film spectrophotometer (NanoCalc 2000 UV–vis–NIR) in transmission mode, from 200 nm up to 1050 nm wavelength. The transmission was monitored in the 200 nm–1050 nm wavelength range while the films were submitted to heating/cooling cycles between 25 °C and 95 °C by using a thermoelectric (Peltier) element with a 3 mm diameter traversing hole in its center.

## 3. Results and discussions

The experimental conditions for thin film deposition are reported in Table 1 along with the electrical resistivity ratio between 25 °C and 95 °C measured using the 4-probe technique. This ratio offers a rapid

\* Corresponding author at: XLIM, CNRS/Université de Limoges, 123 avenue Albert Thomas, 87060 Limoges Cedex, France. Tel.: +33 5 87 50 67 39; fax: +33 5 55 45 76 49.  
E-mail address: [annie.bessaudou@xlim.fr](mailto:annie.bessaudou@xlim.fr) (A. Bessaudou).

**Table 1**

Experimental conditions used for VO<sub>2</sub> thin films deposition along with their electrical characteristics and properties of the MIT phase transition. (\*SCCM denotes Standard Cubic Centimeter per Minute at STP).

Sample	Oxygen pressure (Pa)	Oxygen flow (SCCM*)	Substrate temperature (°C)	Thickness (nm)	Deposition rate (nm/s)	Four-point probe resistivity ratio, $\rho_{25}/\rho_{95}$	MIT transition temperature (°C)	Hysteresis width (°C)
V1	$8.2 \times 10^{-2}$	5.8	510	48	0.049	$5.48 \times 10^2$	75	14
V2	$7.2 \times 10^{-2}$	5.8	494	40	0.045	$3.8 \times 10^3$	70	6
V3	$8.9 \times 10^{-2}$	6.8	514	39	0.051	$4.36 \times 10^3$	71	5
V4	$8.2 \times 10^{-2}$	5.9	495	56	0.034	$1.63 \times 10^4$	73	3

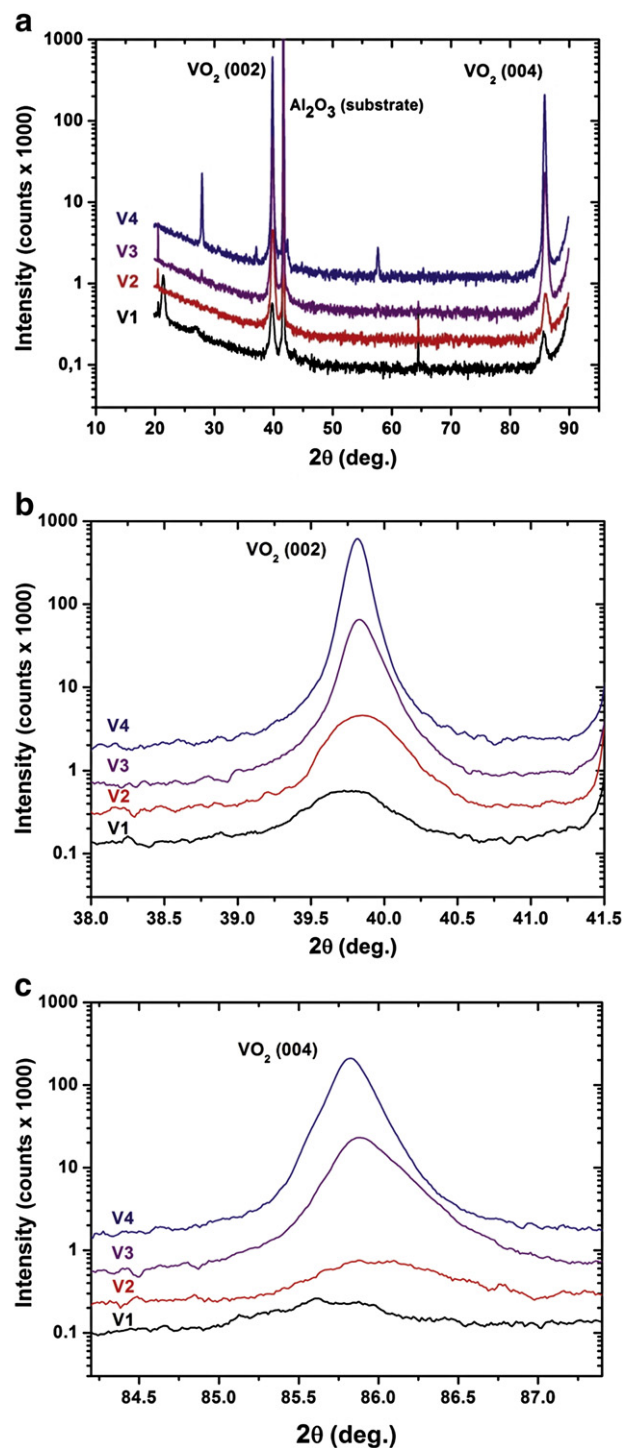
assessment of the temperature-driven phase transition capabilities of the VO<sub>2</sub> material. In order to determine the optimal experimental conditions, we used the MultiSimplex method based on the simplex algorithm [15]. The method allows the simultaneous study of the different experimental variables mentioned in Table 1 by optimizing the answers (values) of all films parameters studied in this work (structural, electrical and optical properties). The deposited films are smooth, uniform with a surface square-mean-roughness of  $S_{sq} \sim 5$  nm (as estimated using a digital holography microscope in transmission mode (DHM from LyncéeTec, Switzerland)).

### 3.1. X-ray diffraction analysis

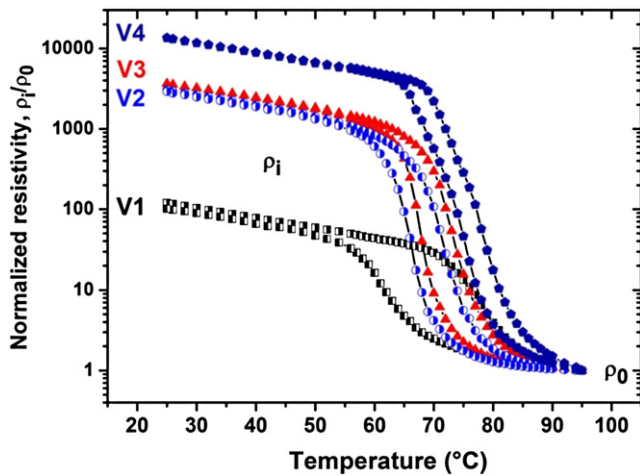
Fig. 1a shows XRD patterns of four samples (V1–V4) realized under different deposition conditions. All samples exhibit a strong peak at  $2\theta \approx 41.7^\circ$  assigned to the (006) orientation of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrate. Two distinct peaks, at  $2\theta \approx 39.9^\circ$  and at  $2\theta \approx 85.9^\circ$  (detailed on Fig. 1b and c, respectively) can be identified on the diffraction spectra of all samples and they may be attributed to the monoclinic phase of VO<sub>2</sub> corresponding to (002) and (004) orientations. On the V1 sample the XRD pattern reveals a peak at  $2\theta \approx 22^\circ$  probably due to an undesired V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> phase, which can be considered as an impurity in our case. The best crystallized sample seems to be V4 because of the sharpest peaks and the presence of the single monoclinic VO<sub>2</sub> phase (the less intense peak observed at  $2\theta \approx 28^\circ$  can be also attributed to VO<sub>2</sub>). The broadening of the peaks at  $2\theta \approx 39.9^\circ$  and at  $2\theta \approx 85.9^\circ$  for samples V1–V3 on Fig. 1b and c may be qualitatively explained by the presence of impure VO<sub>x</sub> phases in these samples, by different crystalline grain sizes or in-build stress in the obtained films.

### 3.2. Electrical properties of the vanadium dioxide films

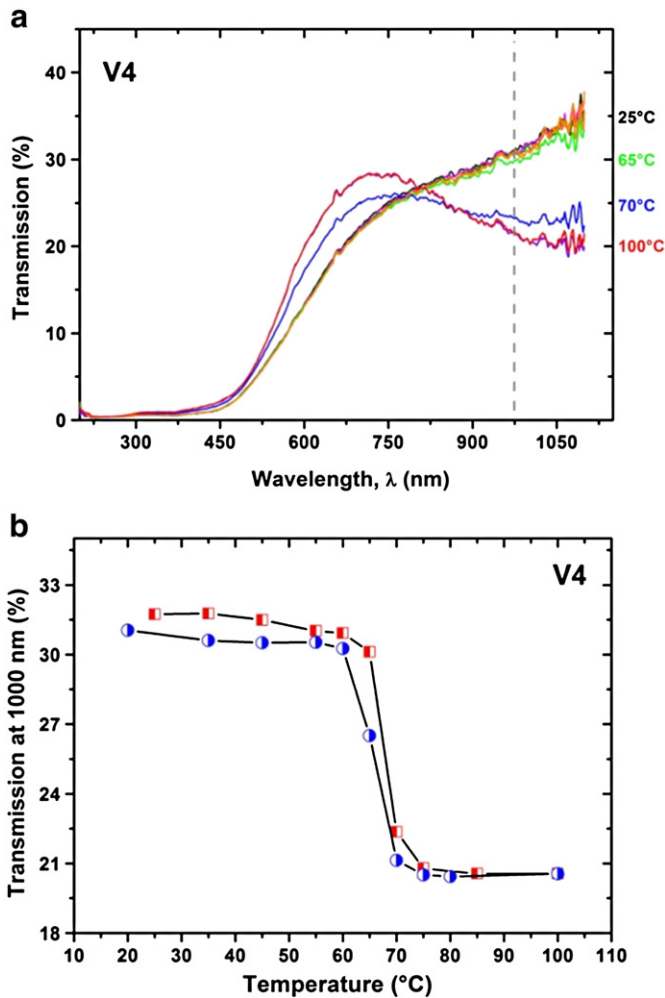
Fig. 2 shows the temperature evolution of the normalized resistivity of samples V1–V4 expressed as  $\rho_i/\rho_0$  where  $\rho_0$  is the resistivity in the metallic state of the films, at  $t_0 = 95^\circ\text{C}$  and  $\rho_i$  is the resistivity measured at temperatures  $t_i$  in the range  $25^\circ\text{C}$ – $95^\circ\text{C}$  and backward. We notice the presence of hysteresis loops (when cycling the temperature forward and backward between 25 and  $95^\circ\text{C}$ ) for which their widths tend to decrease from V1 to V2, V3 and V4 in this order (see values of transition curve widths in Table 1). The MIT transition temperatures for all samples, extracted from these hysteresis curves are also reported in Table 1. Their values, a few degrees higher than the theoretical value of  $68^\circ\text{C}$  can be explained by the temperature sensor position, placed under the substrate holder during resistivity measurements. Along with MIT temperature and hysteresis width, one important parameter describing the quality of the obtained films is the resistivity change of the films between the insulating (at  $25^\circ\text{C}$ ) and metallic phases (at  $95^\circ\text{C}$ ) expressed as the  $\rho_i/\rho_0$  ratio. As reported in Table 1, the resistivity change ratio that increases from  $5 \times 10^2$  for the V1 sample to  $\sim 10^4$  for the V4 sample. The electrical resistivity results are consistent with the XRD data, showing that the films presenting only the monoclinic phase of VO<sub>2</sub> (without additional phase impurities) possess also the best electrical properties (strong phase transition with low hysteresis width). The resistivity values of the sample presenting the best properties (V4, with a thickness of  $\sim 56$  nm), are  $14.68 \Omega\cdot\text{cm}$  at  $25^\circ\text{C}$  and  $1.08 \times 10^{-3} \Omega\cdot\text{cm}$  at  $95^\circ\text{C}$ .



**Fig. 1.** a. XRD patterns corresponding to V1–V4 samples realized under the deposition parameters described in Table 1; b. details of the diffraction peaks corresponding to the VO<sub>2</sub> (002) orientation at  $2\theta \approx 39.9^\circ$  and c. zoom on the diffraction peaks corresponding to the VO<sub>2</sub> (004) orientation at  $2\theta \approx 85.9^\circ$ .



**Fig. 2.** Temperature dependence of the normalized resistivity ( $\rho_i/\rho_0$ ) of samples V1–V4 ( $\rho_0$ : resistivity in the metallic phase, at  $t_0 = 95$  °C;  $\rho_i$ : resistivity measured at  $t_i$  in the range 25 °C–95 °C).



**Fig. 3.** a. Temperature dependence of the optical transmission (from 200 nm to 1050 nm) of sample V4 showing transmittance variation across the MIT transition temperature and b. the hysteresis loop of the optical transmission variation with temperature for  $\lambda = 1000$  nm.

### 3.3. Thermochromic behavior of the VO<sub>2</sub> layers

In general, all the investigated samples V1–V4 show thermochromic performance, with a much more pronounced character for the V4 sample, as expected from its structural and electrical properties presented above which approaches at best those of VO<sub>2</sub> bulk material. Fig. 3a shows a typical optical transmittance variation for the V4 sample when its temperature is cycled between 25 °C and 100 °C, across the transition temperature of the VO<sub>2</sub> layer. We may clearly observe relatively large changes in optical transmission spectrum due to thermochromism of VO<sub>2</sub>, characterized by a first-order phase transition mechanism [15]. As already observed [16] the changes are more pronounced towards higher wavelengths (above 900 nm) and they are expected to increase further towards the far infrared region of the spectrum [17]. The phase switching behavior of the VO<sub>2</sub> layer can be clearly visualized by plotting the transmittance thermal hysteresis loop at a specific wavelength, e.g. at 1000 nm as represented on Fig. 3b. The half-filled square points (red color) show the variation of the film transmittance at 1000 nm during the heating cycle, while the half-filled circles (in blue) mark the same transmittance at 1000 nm during the cooling cycle. The width of the hysteresis cycle is very small, witnessing the high quality of the obtained layers under the experimental conditions described for the V4 sample.

### 4. Conclusions

We obtained high quality VO<sub>2</sub> films on c-type sapphire substrate by using reactive electron beam evaporation of a vanadium target under pure oxygen atmosphere. VO<sub>2</sub> thin films realized under optimized experimental conditions exhibit a pronounced metal–insulator phase transition around 68 °C with a magnitude of the resistivity change as high as  $10^4$  and a transition width as low as 3 °C for the best samples. The films show thermochromic behavior, directly connected with structural and electrical properties. We obtained large changes in visible–NIR optical transmission spectrum across the transition temperature (15% at  $\lambda = 1000$  nm). The results presented here indicate the potential of the VO<sub>2</sub> layers in the field of oxide electronics for realizing electrical and optoelectronic switching devices based on the MIT phase transition.

### Acknowledgments

The authors acknowledge the help of Jean-Paul Laval from SPCTS Laboratory/ Université de Limoges for realising the XRD measurements.

### References

- [1] D. Adler, Rev. Mod. Phys. 40 (1968) 714.
- [2] T. Ben-Messaoud, G. Landry, J.P. Gariépy, B. Ramamoorthy, P.V. Ashrit, A. Haché, Optics Commun. 281 (2008) 6024.
- [3] Y.W. Lee, B.J. Kim, S. Choi, H.T. Kim, G. Kim, Opt. Express 15 (2007) 12108.
- [4] C. Chen, R. Wang, L. Shang, C. Guo, Appl. Phys. Lett. 93 (2008) 171101.
- [5] J. Sakai, M. Kurisu, Phys. Rev. B 78 (2008) 033106.
- [6] G. Li, X. Wang, J. Liang, A. Ji, M. Hu, F. Yang, J. Liu, N. Wu, H. Chen, 2nd IEEE International Nanoelectronics Conference (INEC 2008), Pudong-Shanghai, China, 24–27 March 2008, Conference Proceedings, 2008, p. 921.
- [7] E. Strelcov, Y. Lilach, A. Kolmakov, Nano Lett. 9 (2009) 2322.
- [8] H.T. Kim, B.G. Chae, D.H. Youn, S.L. Maeng, G. Kim, K.Y. Kang, Y.S. Lim, New J. Phys. 6 (2004) 52.
- [9] M.M. Qazilbash, M. Brehm, B.G. Chae, P.C. Ho, G.O. Andreev, B.J. Kim, S.J. Yun, A.V. Balatsky, M.B. Maple, F. Keilmann, H.T. Kim, D.N. Basov, Science 318 (2007) 1750.
- [10] J. Givernaud, A. Crunteanu, A. Pothier, C. Champeaux, A. Catherinot, P. Blondy, IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Boston, U.S.A., 7–12 June 2009, IEEE MTT-S Digest, 2009, p. 109.
- [11] G. Garry, O. Durand, A. Lordereau, Thin Solid Films 453–454 (2004) 427.
- [12] S.J. Yun, J.W. Lim, B.G. Chae, B.J. Kim, H.T. Kim, Phys. B Condens. Matter 403 (2008) 1381.
- [13] Y. Nihei, Y. Sasakawa, K. Okimura, Thin Solid Films 516 (2008) 3572.
- [14] G.A. Nyberg, R.A. Buhrman, J. Vac. Sci. Technol. A 2 (1984) 301.
- [15] W. Spindley, G.R. Hext, F.R. Himsworth, Technometrics 4 (1962) 441.
- [16] G. Xu, C.M. Huang, P. Jin, M. Tazawa, D.M. Chen, J. Appl. Phys. 104 (2008) 053101.
- [17] H. Kakiuchida, P. Jin, M. Tazawa, Int. J. Thermophys. 31 (2010) 1964.



## 2.2. REALISATION DE COMMUTATEURS ELECTRIQUES BASES SUR LA TRANSITION ISOLANT- METAL DU VO<sub>2</sub>

Pour la réalisation de dispositifs pratiques, *l'activation électrique du VO<sub>2</sub>* (application d'une tension ou injection d'un courant dans le matériau en utilisant une configuration à deux ou trois électrodes métalliques/ terminaux) est **une approche attractive et souhaitable par rapport à l'activation thermique** car elle offre des temps d'activation plus faibles et surtout une implémentation plus facile. Il nous a semblé donc important d'étudier dans un premier temps **les caractéristiques courant-tension (I-V) de ces commutateurs à VO<sub>2</sub> ainsi que leur fiabilité** lors de leur actionnement électrique, en appliquant une tension ou par injection d'un courant.

### 2.2.1 COMMUTATEURS A DEUX TERMINAUX A BASE DE VO<sub>2</sub> : CARACTERISTIQUES COURANT-TENSION

Nous avons donc fabriqué, dans un premier temps, des composants de type deux-terminaux (2T) en utilisant les technologies classiques de micro fabrication en salle blanche. Des films minces de VO<sub>2</sub> ont été déposés en utilisant l'ablation laser réactive d'une cible de vanadium sous atmosphère d'oxygène, sur des substrats d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> type c [18, 19]. Comme mentionnée avant, les films de VO<sub>2</sub> de 200-nm d'épaisseurs obtenus sont cristallins et montre un changement de résistivité d'environ 4- 5 ordres de grandeurs pendant la transition MIT initiée thermiquement [18]. En utilisant les procédés de lithographie et de gravure humide nous obtenons des composants planaires constitués de motifs de VO<sub>2</sub> de forme rectangulaire de largeur 20- $\mu$ m sur lesquels nous disposons deux électrodes métalliques (typiquement en Ti/ Au). La longueur du dispositif 2T à VO<sub>2</sub> est définie par la distance entre ces électrodes, comprise entre 5- $\mu$ m et 100- $\mu$ m (Figure 2.10).

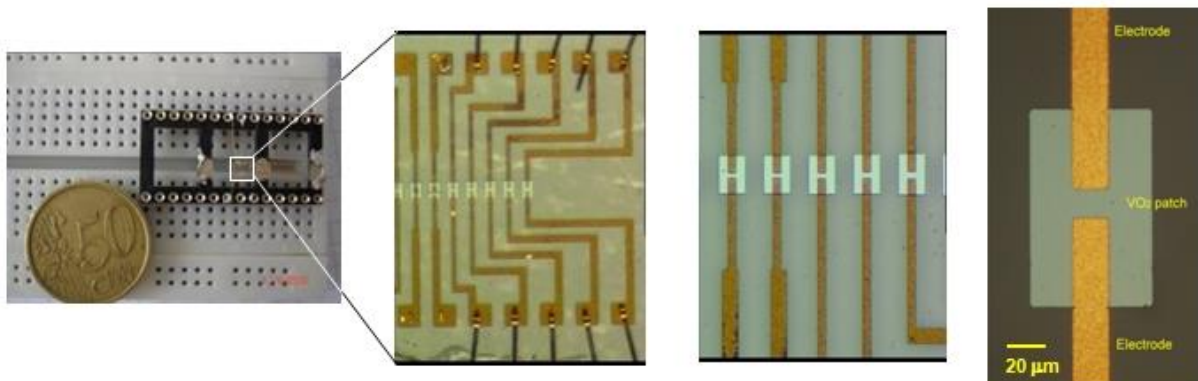


Figure 2.10. Photographie globale et images par microscopie optique d'un dispositif intégrant plusieurs commutateurs électriques à base de VO<sub>2</sub>.

La caractéristique courant (I) en fonction de la tension (V) (caractéristique I-V) du dispositif 2T à VO<sub>2</sub> réalisé est mesurée en insérant simplement celui-ci dans un circuit électrique contenant une résistance série (de 50 à 1 k $\Omega$ ) et une source-mètre Keithley 2612A travaillant en mode tension ou en mode courant (Figure 2.11a). La source permet à la fois, d'alimenter le circuit (Figure 2.11b) et de mesurer la tension à ses bornes. Les mesures de tensions aux bornes des éléments du circuit (dispositif 2T à VO<sub>2</sub> et résistance série) ont été également réalisées à l'aide d'un oscilloscope Tektronix DPO7254 où une première voie sert à mesurer la tension aux bornes du VO<sub>2</sub> et une seconde permet de déterminer le courant circulant réellement dans le circuit par l'intermédiaire d'une mesure en tension aux bornes de la résistance série R<sub>S</sub>.

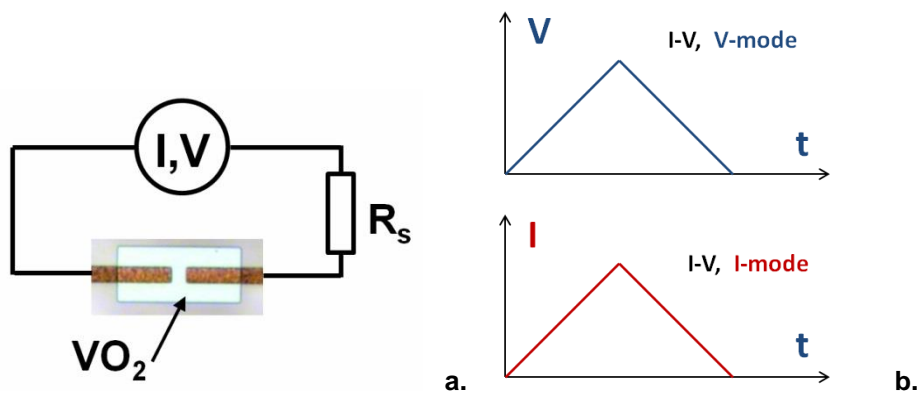


Figure 2.11. a. Schéma du circuit électrique employé pour enregistrer la caractéristique I-V du dispositif 2T à  $\text{VO}_2$  et b. représentations graphiques de la tension et du courant respectivement en mode V et en mode I.

Sur les Figures 2.12 a et b sont représentées les caractéristiques I-V en mode tension et, respectivement, en mode courant, d'un dispositif 2T contenant un motif typique de  $\text{VO}_2$  (20  $\mu\text{m}$  en longueur et 20  $\mu\text{m}$  de large).

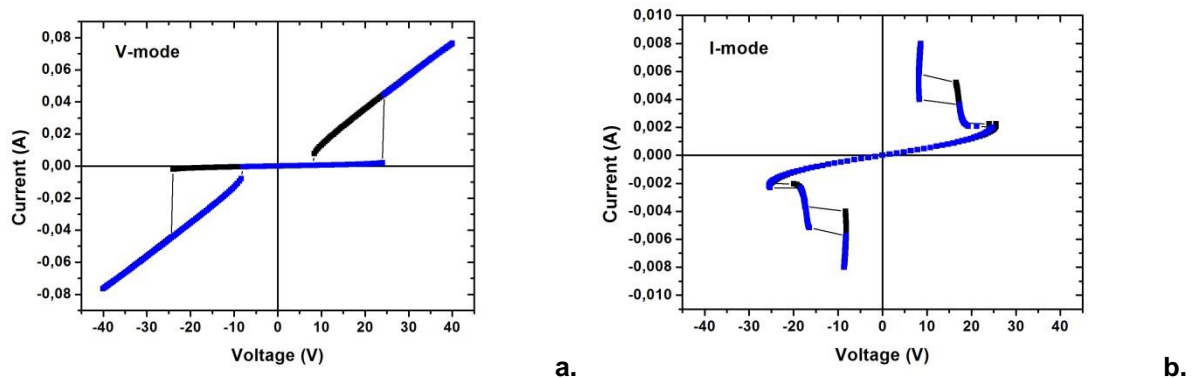


Figure 2.12. Caractéristiques I-V en mode tension (a.) et en mode courant (b.) d'un dispositif 2T intégrant un motif de  $\text{VO}_2$  (20  $\mu\text{m}$  de long et 20  $\mu\text{m}$  de large).

En mode tension (Figure 2.12 a), la transition isolant-métal se repère par la présence d'une tension seuil ( $\sim 25\text{V}$ ), suivi par un saut abrupt en courant. De 0 à 25 V, le matériau est isolant, avec une caractéristique I-V qui suit une loi de conduction de type Poole-Frenkel (pour lequel le  $\ln(J)$  – densité de courant, évolue linéairement avec la racine carrée du champ  $E$  appliqué). Une fois la tension seuil atteinte, le matériau passe dans un état métallique et pour des tensions supérieures à 25 V, sa caractéristique I-V obéit à une loi linéaire de type loi d'Ohm. Lors de la descente en tension, on note la présence d'un fort cycle d'hystérésis pour cette activation en tension. Ce phénomène témoigne d'une différence nette entre les constantes de temps associées à la transition isolant-métal et inversement, métal-isolant. Il est également difficile d'évaluer le mécanisme physique de cette transition MIT ; il peut être le résultat de l'application du champ électrique à travers le dispositif mais la transition MIT peut également émaner d'un échauffement par effet Joule (au-delà de la température de transition MIT de  $68^\circ\text{C}$ ) lors du passage des forts courants à travers la couche mince.

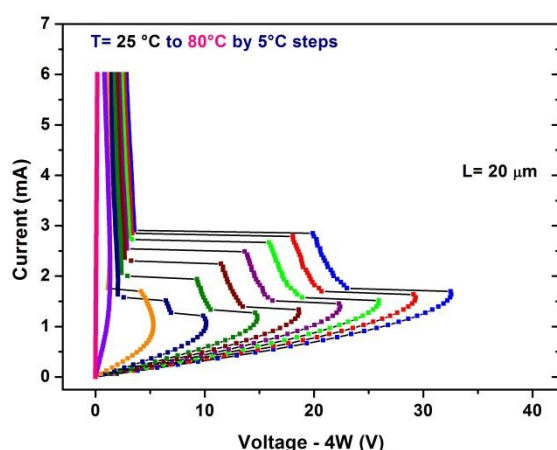
Le temps de commutation MIT du  $\text{VO}_2$  mesuré sur plusieurs échantillons varie de quelques centaines de nanosecondes à quelques 5 ns (pour des dispositifs à gap nanométrique entre les électrodes) [18, 39]. Ces valeurs sont au moins un ordre de grandeurs plus petites que les constantes de temps d'une transformation MIT purement thermique (estimées de manière analytique, en supposant que le passage du courant dans le dispositif élève la température du motif  $\text{VO}_2$  au-delà de la température de transition de  $68^\circ\text{C}$ ). Néanmoins il est difficile de statuer de manière définitive, dans



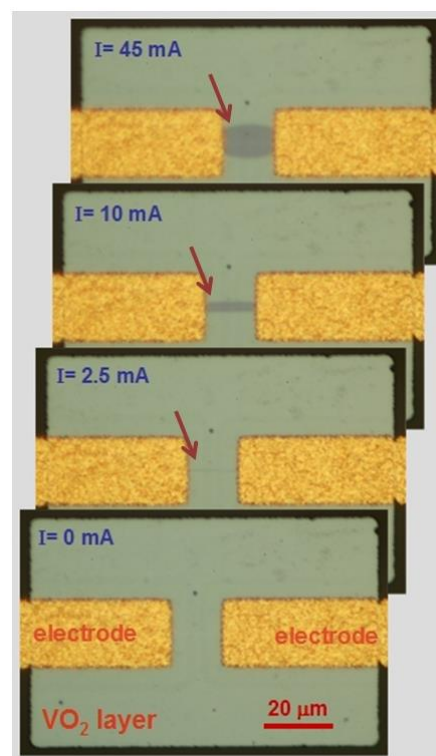
cette configuration 2T, sur le mécanisme précis conduisant à la transition isolant-métal du  $\text{VO}_2$ .

En mode courant (Figure 2.12 b) la caractéristique I-V du même dispositif 2T présente une allure complètement différente. La présence d'un seuil en courant ( $\sim 2$  mA) suivi par une diminution de la tension aux bornes du dispositif et donc **l'apparition d'une zone à résistance différentielle négative** (ou NDR) marque l'endroit où le  $\text{VO}_2$  transite d'un état isolant à un état métallique. Dans cette configuration de mesure, le cycle d'hystérésis est moins marqué que dans le cas de l'activation de la transition MIT en mode tension.

Dans les deux configurations de mesure (mode tension et courant), les caractéristiques I-V dépendent fortement de la température du composant, plus précisément de la résistivité initiale du motif de  $\text{VO}_2$  (qui varie, elle, avec la température). Cette évolution en mode courant, est représentée, à titre d'exemple, sur la Figure 2.13a pour un composant similaire à celui montré sur la Figure 2.11 a. D'autres facteurs peuvent influencer l'allure des caractéristiques I-V : les dimensions des dispositifs (largeur et longueur des motifs de  $\text{VO}_2$ ) et l'épaisseur de la couche de dioxyde de vanadium.



a.



b.

Figure 2.13. a. Evolution en fonction de la température des caractéristiques I-V en mode courant d'un composant 2T à  $\text{VO}_2$  (motif de  $\text{VO}_2$   $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ , épaisseur 200 nm). b. Visualisation par microscopie optique de la transition de phase semi-conducteur- métal (MIT) du  $\text{VO}_2$  lors de l'injection progressive du courant dans le dispositif.

Lors de l'injection progressive du courant dans le dispositif 2T à  $\text{VO}_2$ , nous observons également (simplement par microscopie optique en réflexion) un changement de couleur de la zone où le matériau transite d'un état isolant vers un métallique. Ce phénomène graduel peut être matérialisé par l'apparition d'un filament dont la largeur augmente (Figure 2.13b). L'apparition de ce filament coïncide avec la fin de la zone NDR sur la caractéristique I-V du composant et au passage à l'état métallique du  $\text{VO}_2$ , confirmé par des mesures par spectroscopie Raman (résultats en cours de rédaction et non rapportés ici).

## 2.2.2 PROPRIETES ELECTRIQUES NON-LINEAIRES DES DISPOSITIFS 2T A BASE DE VO<sub>2</sub> : PHENOMENE D'AUTO-OSCILLATIONS [40, 41]

Comme nous l'avons montré dans la section précédente, l'enregistrement de la caractéristique courant- tension d'un commutateur à deux terminaux à base de VO<sub>2</sub>, montre clairement l'apparition de la transition de phase MIT (Figure 2.12). De plus, l'actionnement électrique en mode courant révèle sur la caractéristique I-V du dispositif une **zone de résistance différentielle négative (NDR)**, extrêmement intéressante du point de vue fondamental (par rapport aux mécanismes de la transition MIT) mais aussi par rapport aux applications qui peuvent en découler. En effet, l'existence de cette zone NDR est à l'origine **d'oscillations intrinsèques** qui peuvent se développer dans le dispositif lors de l'injection d'un courant continu. Des recherches récentes [42, 43] ont également mis en évidence l'apparition du phénomène de génération de signaux périodiques entretenus (auto-oscillations) aux bornes des dispositifs à deux-terminaux (2T) à base de VO<sub>2</sub> mais dans le cas où la transition MIT du matériau est initiée par un actionnement en tension.

Le phénomène d'oscillations est illustré ici sur un dispositif avec un gap de 350  $\mu\text{m}$  entre les électrodes et un motif de VO<sub>2</sub> de 50  $\mu\text{m}$  de large mais le même comportement décrit ci-dessous a été relevé sur un ensemble de composants de gaps et largeurs de VO<sub>2</sub> différents. La caractéristique I-V en mode courant de ce dispositif est montrée sur la Figure 2.14 (mesure type 4-wires, permettant d'éliminer de la mesure les valeurs de la résistance série et des résistances parasites de câbles de connexion). Elle montre, dans ce cas particulier, l'apparition de deux zones NDR (NDR1 e NDR2).

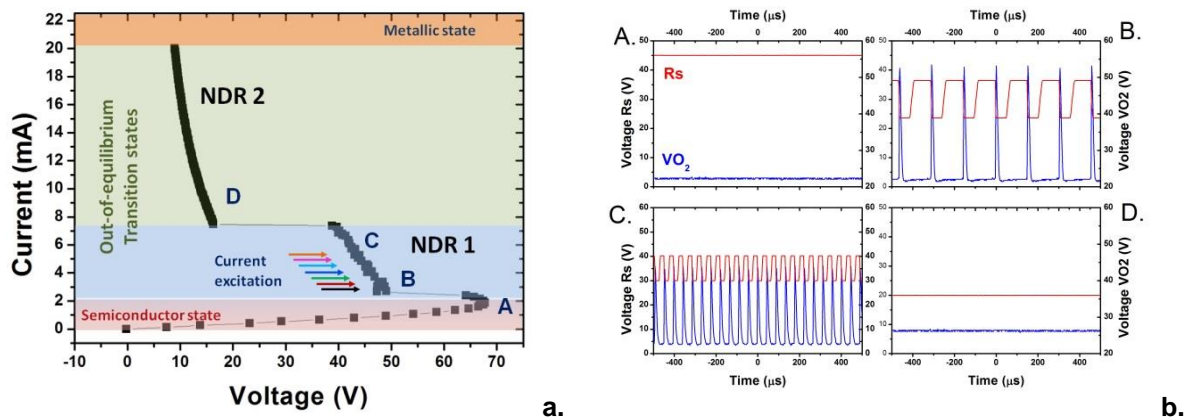


Figure 2.14. a. Caractéristique fortement non-linéaire I-V d'un dispositif 2T à VO<sub>2</sub> (motif 350x 50  $\mu\text{m}^2$ ) : apparition de deux zones caractérisées par une NDR. b. Relevés de la tension en fonction du temps aux bornes du dispositif à VO<sub>2</sub> et aux bornes de la résistance série, R<sub>S</sub>, lorsqu'un courant continu est appliqué dans les zones NDR1 et NDR2.

Lorsqu'on applique au circuit (Figure 2.11 a) un courant continu avec différentes amplitudes pour parcourir les différentes zones de la caractéristiques I-V (lettres A, B, C, et D de la Figure 2.14a), nous observons l'apparition d'un signal périodique oscillant aux bornes du dispositif 2T à VO<sub>2</sub> et de la résistance R<sub>S</sub> (Figure 2.14b) mais seulement dans le cas où le courant continu d'excitation prend des valeurs correspondantes à la première zone NDR (entre ~2 et 6 mA pour la caractéristique de la Figure 2.14a). L'injection de courants continus avec des valeurs correspondantes à la zone A ou à la zone D (NDR2) de la caractéristique I-V ne génère pas d'auto-oscillations.

Les caractéristiques du signal oscillant obtenu (amplitude et fréquence) dépendent **de l'amplitude du courant continu injecté** dans la zone NDR (Figure 2.15), **de la température et des dimensions géométriques du dispositif**, mais aussi d'autres facteurs externes (**pression, environnement**). Ce phénomène de génération du signal auto-oscillant dans le dispositif (avec des fréquences propres de 15 kHz à ~1 MHz, selon les propriétés du dispositif à VO<sub>2</sub>) peut s'expliquer par la transition périodique du phénomène MIT (alternance formation/ destruction de zones capacitives/ résistives dans le

matériau VO<sub>2</sub>, dues à la coexistence de nano-domaines métalliques et isolantes dans la structure du matériau). Nos résultats montrent également que les éléments présents dans le circuit (résistance série, capacité en parallèle avec le composant à VO<sub>2</sub>) peuvent influencer également sur l'ampleur des auto-oscillations [40].

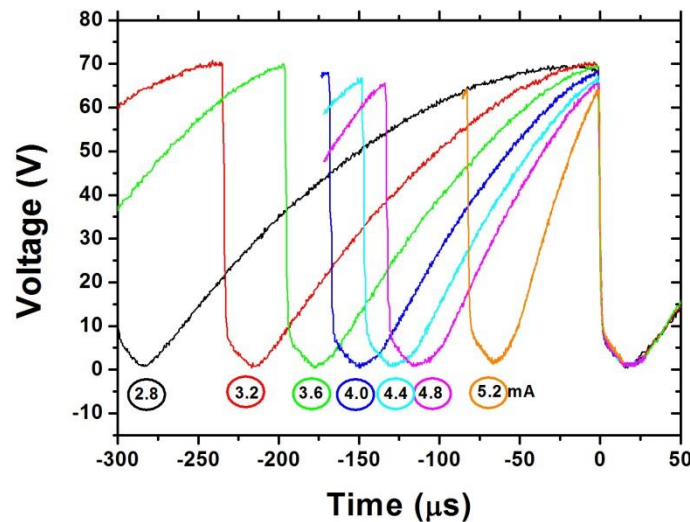


Figure 2.15. Influence de l'amplitude du courant continu injecté dans le dispositif sur l'amplitude et la fréquence des signaux oscillants aux bornes du dispositif 2T à VO<sub>2</sub> (une seule période montrée sur la figure).

Le circuit électrique incorporant le dispositif à VO<sub>2</sub> présentant une NDR s'apparente au fonctionnement d'un **oscillateur à résistance négative différentielle de type van der Pol (oscillateur à relaxation)** [44, 45] ou, plus simplifié, de type **Pearson-Anson** [46,47].

Actuellement, **nous visons à identifier à l'échelle micro- et nanométrique les phénomènes physiques mises en œuvre lors de la transition MIT et de l'apparition de la zone NDR** (apparition de filaments isolant-métal, percolation des domaines isolant- métal et modification de la structure du matériau lors de l'injection du courant) et **l'influence de la température et du dopage sur ces caractéristiques et sur le temps de réponse** du matériau etc.. Cette étude est réalisée à travers une **étape essentielle de modélisation** des réponses de ces dispositifs (en fonction du type de circuit, des matériaux, des dimensions, etc.), dans le cadre d'une collaboration avec le département DMI d'XLIM. Nous envisageons la modélisation de ces oscillateurs à l'aide d'un modèle simple de circuit électrique afin de faciliter le développement de dispositifs à deux ou trois terminaux.

Nous envisageons des applications extrêmement innovantes comme des **nano-générateurs de signaux intégrés sur puce**, la conception et la réalisation **d'oscillateurs et d'amplificateurs** avec une montée en fréquence du RF vers le domaine des micro-ondes, **des inverseurs et mélangeurs de fréquence, des capteurs large bande extrêmement sensibles (température, pression, gaz)**.

## RESEARCH PAPER

# Generation of electrical self-oscillations in two-terminal switching devices based on the insulator-to-metal phase transition of VO<sub>2</sub> thin films

JONATHAN LEROY<sup>1</sup>, AURELIAN CRUNTEANU<sup>1</sup>, JULIEN GIVERNAUD<sup>1</sup>, JEAN-CHRISTOPHE ORLIANGES<sup>2</sup>,  
CORINNE CHAMPEAUX<sup>2</sup> AND PIERRE BLONDY<sup>1</sup>

*We present the non-linear electrical properties of simple two-terminal switching devices based on vanadium dioxide (VO<sub>2</sub>) thin films. The current–voltage characteristics of such devices present negative differential resistance (NDR) regions allowing generating electrical self-oscillations across the investigated devices, with frequencies ranging from several kHz up to 1 MHz. We investigate and compare the factors determining the onset of oscillatory phenomenon in both voltage- and current-activated oscillations and explain its origin. For both activation modes, we will correlate the properties of electrical oscillations (amplitude and frequency) with the amplitude of the continuous excitation signal, the physical geometry of the devices or ambient temperature. We conclude by mentioning several possible applications for the oscillation generation in the radiofrequency (RF)/microwave domains (inverters, integrated a.c. signal generators, pressure and temperature sensors, etc.).*

**Keywords:** Vanadium dioxide, Electrical switching, Self-oscillations, Metal-insulator transition

Received 30 May 2011; Revised 19 September 2011; first published online 17 November 2011

## I. INTRODUCTION

Currently, smart materials are the subject of increasing attention for the scientific community because of their ability to change their properties (resistivity, dielectric, magnetic, optical constants, etc.) under external stimuli, which makes them potential attractive candidates for a broad range of applications where tunable devices and systems are needed [1]. Among these materials, the vanadium dioxide (VO<sub>2</sub>) is an interesting system to be studied, since it presents a reversible, temperature-induced metal–insulator transition (MIT) at 68°C, transition that induces major changes in its electrical and optical properties [2, 3]. Thus, at room temperature, VO<sub>2</sub> has the properties of a semiconductor with monoclinic crystal structure but above its transition temperature of 68°C, the material behaves like a metal, with a rutile tetragonal structure. Consequently, this electronic and structural transition is accompanied by a significant change in the electrical resistivity of the material (three to five orders of magnitude) and modifies consequently its optical and tribological properties [2, 3]. More interesting, besides the thermal-induced transition [2, 4], the MIT of VO<sub>2</sub> thin films can be triggered on

faster timescales (picoseconds to nanoseconds) using different stimuli: electron injection (voltage- or current-induced MIT) [3, 4], optically (photon absorption) [5], or under the effect of an external stress [6]. The electrically triggered MIT-inducing resistivity change of VO<sub>2</sub>-based two-terminal (2 T) devices was already used to demonstrate electrical switches from DC to microwave [7], and THz frequencies [8], integrated reconfigurable filters in the microwave domain [9, 10] or microwave power limiters [11].

Recently, several reports [4, 12] highlighted the non-linear *I*–*V* characteristic of electrical switches based on VO<sub>2</sub> thin layers and the occurrence of periodic signals (self-oscillations) maintained across 2 T devices. The phenomenon is initiated by applying a continuous voltage to the 2 T device (carrier injection).

In this paper, we demonstrate the appearance of similar self-oscillations across VO<sub>2</sub>-based 2 T devices in the case of continuous or pulsed current injection in the devices. We will show that this current activation scheme generating self-oscillations across the device has several advantages compared to the voltage-activated oscillations and we will try to establish a physical model explaining its appearance in the non-linear device. We will also compare the properties and the conditions for self-oscillation generation in the VO<sub>2</sub>-based 2 T devices for both current- and voltage-activated phenomena.

## II. EXPERIMENTAL

The 2 T VO<sub>2</sub>-based electrical devices were fabricated in a similar way as presented in [7, 13]. Briefly, VO<sub>2</sub> thin films

<sup>1</sup>XLIM UMR 6172, CNRS/Université de Limoges, Avenue Albert Thomas, 87060 Limoges, France. Phone: +33 5 87 50 67 41.

<sup>2</sup>SPCTS UMR 6638, CNRS/Université de Limoges, CEC, 12 rue Atlantis, 87068 Limoges, France.

**Corresponding authors:**

J. Leroy and A. Crunteanu

Emails: jonathan.leroy@xlim.fr; aurelian.crunteanu@xlim.fr



were deposited on C-type sapphire substrates using reactive laser ablation of a pure vanadium target (99.95%) in an oxygen atmosphere (the experimental conditions are detailed elsewhere [9]). The obtained films, with thicknesses up to 200 nm, are crystalline and show a resistivity change of four to five orders of magnitude during the thermally initiated MIT [11]. The 2 T electrical switches were manufactured in clean room environment [9, 11] using conventional micro-fabrication techniques. We prepared rectangular patterns of  $\text{VO}_2$  (defined by optical lithography and wet etching) on which we deposit a pair of metallic electrodes (Cr/Au bi-layer) separated by different distances. The distance between the metallic electrodes defines the length of the  $\text{VO}_2$  device [13]. We investigated devices with different lengths from 5  $\mu\text{m}$  up to 350  $\mu\text{m}$ .

The current-voltage ( $I$ - $V$ ) characteristics of the obtained 2 T devices is recorded by introducing the device into a simple electrical circuit (insert in Fig. 1(a)), containing a series resistance,  $R_S$  (typical 1 k $\Omega$ ), and a source meter (Keithley 2612A) operating in both voltage and current modes. The source provides power to the circuit and allows measuring the circuit current and the voltage across its terminals. For studying the appearance of the oscillation regime, we measured the voltages across all the circuit elements ( $\text{VO}_2$  device and series

resistance) using a broad bandwidth four-channel oscilloscope (Tektronix DPO7254): the first channel was used to measure the voltage across the  $\text{VO}_2$  device, while the second one monitors the current flowing in the circuit (through the voltage drop in the series resistor).

### III. RESULTS AND DISCUSSION

#### A) Non-linear $I$ - $V$ characteristic of $\text{VO}_2$ -based devices

A typical  $I$ - $V$  characteristic of a 2 T  $\text{VO}_2$ -based switch ( $\text{VO}_2$  pattern of 25  $\mu\text{m}$  in length and 18  $\mu\text{m}$  in width) is shown in Fig. 1(a) for both voltage and current modes. The MIT electrically induced transition is clearly visible for both activation modes as an abrupt change in the device's resistance, marked by a sudden increase of current in the circuit for  $V_{th} \sim 12$  V in the voltage mode (indicated by an arrow, red curve) or by a sudden decrease of the switch voltage in the current mode, for injected currents of  $I_{th} \sim 4$  mA. In the voltage-activated MIT mode, the transition presents an important hysteresis loop (when sweeping back the voltage), associated probably with thermal effects developed in the device due to "jumping" toward high current values after the MIT. This hysteretic behavior becomes practically inexistent during the current-activated MIT (almost perfect superposition of the two upward and downward current-sweeping curves, see Fig. 1(a)). For both types of electrical activation, one can identify three main regions in the  $I$ - $V$  characteristic, as indicated in Fig. 1(b) for the current-activated transition: the first region (A), of low currents (between 0 and  $\sim 4$  mA for the investigated device), corresponding to a highly resistive, semi-conducting state for the  $\text{VO}_2$  layers, the second, highly non-linear region (B) related to the MIT transition of the material and, finally, the third zone (C) corresponding to a low resistance state of the  $\text{VO}_2$ , when the material changes to its metallic state (strong currents, above 15 mA). As indicated in Fig. 1(b), the non-linear region (B) (in the current mode) shows two sub-regions presenting negative differential resistance (NDR1 and NDR2). It was suggested that the emergence of these NDR regions is the result of a progressive apparition of the MIT in the  $\text{VO}_2$  material, in a percolative manner (gradual growth of metallic  $\text{VO}_2$  nano-domains within the  $\text{VO}_2$  semiconductor matrix and co-existence between the semi-conductor and metallic domains in the  $\text{VO}_2$  films) [6, 14, 15]. Similar 2 T  $\text{VO}_2$  circuits integrated on coplanar waveguides were previously extensively studied in the RF/microwave domains [7, 9–11] and besides their employment as broadband, high-speed microwave switches, they show potential to sustain RF powers levels up to several watts, depending on their geometry and type of implementation (shunt or series configurations) [11].

#### B) Current-induced self-oscillations in the $\text{VO}_2$ switches

It is well known that the presence of an NDR region in a component  $I$ - $V$  characteristic is one of the prerequisite properties for obtaining current/voltage oscillations [16, 17]. To verify this and for initiating the oscillating phenomenon in the current mode, we applied in the electrical circuit (insert in

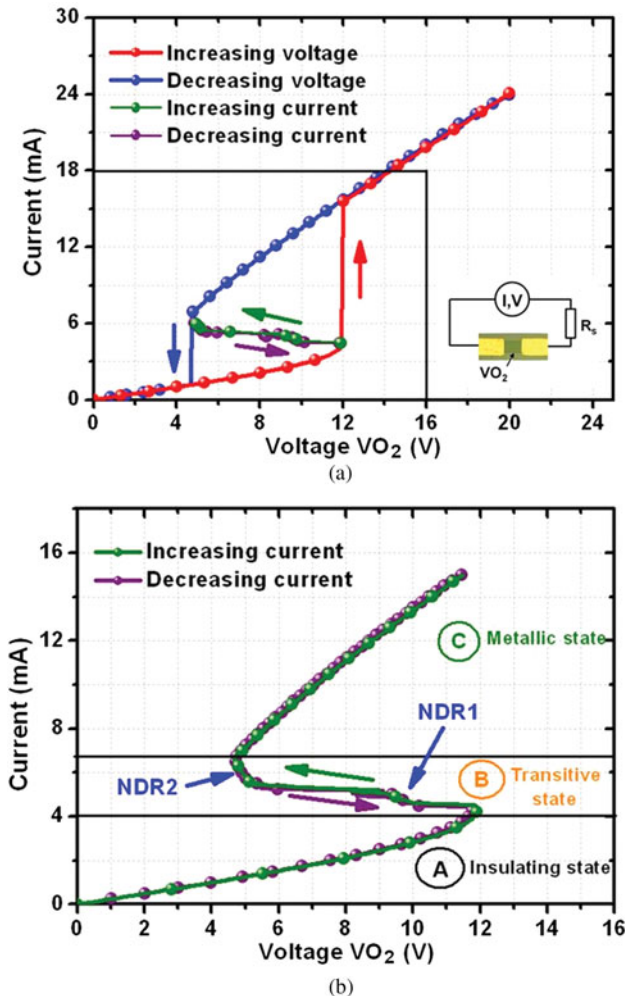


Fig. 1. (a)  $I$ - $V$  characteristic in voltage- and current-mode of a device incorporating a  $\text{VO}_2$  pattern (25- $\mu\text{m}$ -long and 18- $\mu\text{m}$ -wide) within insert, the test circuit; (b) zoom on the  $I$ - $V$  characteristic of the current mode.

Fig. 1(a)) square-type current signals (2-ms long) with different amplitudes that corresponds to the different regions (A, B-NDR1 and B-NDR2 and C) in the  $I$ - $V$  characteristic of the  $25\text{ }\mu\text{m} \times 18\text{ }\mu\text{m}$  VO<sub>2</sub> device.

As illustrated in Fig. 2, we observed the apparition of the current-induced self-oscillations in the VO<sub>2</sub> material only for current amplitudes corresponding to the first NDR region (NDR1). Thus, the origin of these oscillations is directly related to the presence of the NDR region in the  $I$ - $V$  characteristic of the device operated in the current mode.

Figure 3 shows the typical shape of the voltage oscillation over a period for both the voltage across the VO<sub>2</sub> device (red curve) and the voltage across the series resistance (blue curve) (for a  $350\text{-}\mu\text{m}$ -long and  $50\text{-}\mu\text{m}$ -wide device, heated to  $50^\circ\text{C}$ ). The shape of the VO<sub>2</sub> voltage curve suggests behavior similar to a relaxation oscillator: a capacitance (the VO<sub>2</sub> material, seen as a percolative mixture of metallic and isolating nano-domains) is charging until the electrical field across it reaches a critical value (zone (E) in Fig. 3). For certain materials, this critical field may cause the destruction of the material because it corresponds to the maximum electrical field that the material can handle (disruptive or electrical breakdown field). In the case of VO<sub>2</sub>, this threshold electrical field will trigger the MIT transition and the material changes abruptly to a low-resistance metallic state, leading to the formation of a highly conductive path between the two metallic electrodes (zone (F) in Fig. 3). The charges accumulated on the electrodes of the device are rapidly released in the circuit and a current pulse is created (corresponding to the voltage pulse on the series resistor, blue curve in Fig. 3). The electric field across the VO<sub>2</sub> switch drops sharply to values corresponding to the VO<sub>2</sub>'s isolating state and the material recovers its original semiconductor state and, if the conditions for the onset of oscillating behavior are satisfied, a new cycle of oscillations begins. During one period of oscillation (zones (E) and (F) in Fig. 3), the shape of the VO<sub>2</sub> voltage-charging curve (before the initiation of

the MIT) can be fitted (equivalent to several constants) with a well-known expression derived from an RC circuit analysis:

$$V_{\text{VO}_2} \sim V_{\text{ap}}(1 - \exp(-t/\tau)), \quad (1)$$

where  $V_{\text{ap}}$  is the overall delivered voltage by the source meter and  $\tau = RC_T$  is the time constant of the circuit, as the product of the overall resistance in the circuit ( $R_S + R_{\text{VO}_2}$ ) and of its overall capacitance,  $C_T$ .

The equivalent circuit of the VO<sub>2</sub> 2 T switch (in the electrical diagram in the inset in Fig. 1(a)) can be represented as a variable capacitor,  $C_{\text{VO}_2}$ , in parallel with a variable resistor,  $R_{\text{VO}_2}$ , both of which are functions of the voltage across the device (but also of the ambient temperature as for the thermally triggered MIT [2–4, 7]). Most likely, the shape of the VO<sub>2</sub> voltage-charging curve during oscillations in the zone (E) in Fig. 3 is governed by the overall capacitance ( $C_T$ ) of the electrical circuit depicted in the inset in Fig. 1(a). This overall capacitance includes, besides the variable capacitance  $C_{\text{VO}_2}$ , also a small contribution from parasitic capacitances coming from connecting cables. To verify the influence of external capacitances in the circuit, we included, in parallel to the VO<sub>2</sub> switch, additional capacitors with precise capacitance values ( $C_P$ ). Preliminary results (experiments are still underway) show that, in these cases, the self-oscillation frequencies decrease with increase in the added capacitances values. The phenomenon can be explained by an increase in the overall capacitance of the circuit ( $C_P$  and  $C_{\text{VO}_2}$  will add, since in parallel) and, consequently, of the time constant in the circuit ( $\tau = RC_T$ ), which involves a decrease in the oscillating frequencies.

The self-oscillation frequency appearing in the NDR1 varies between 1 kHz and 1 MHz, depending primarily not only on the size of the VO<sub>2</sub> pattern but also on excitation or external environmental parameters (temperature) as will be shown in Section III(D).

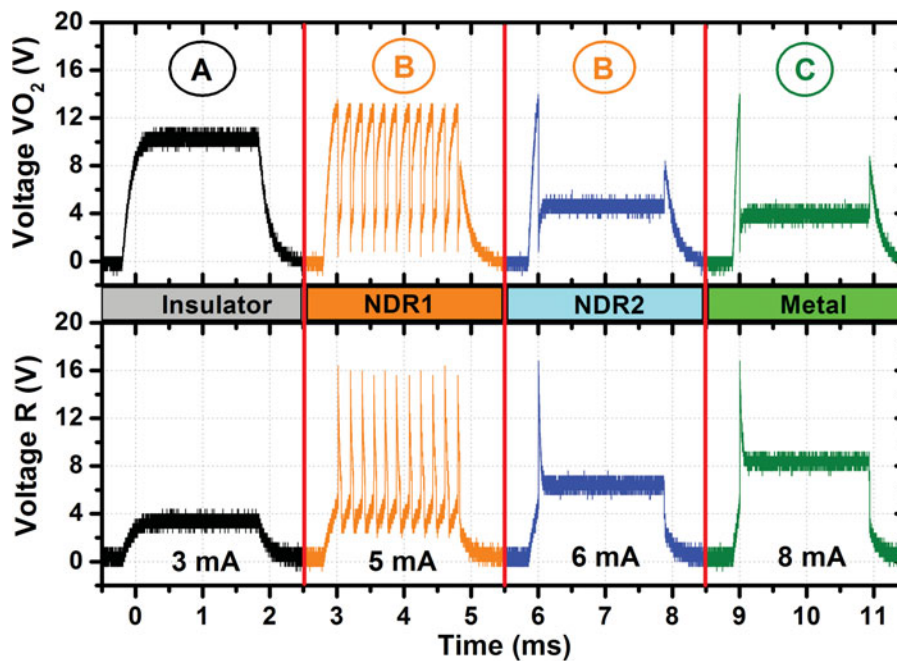


Fig. 2. Voltage pulses observed across of VO<sub>2</sub> pattern and series resistance during the injection of current pulses of 2 ms with different amplitudes in the device of Fig. 1.



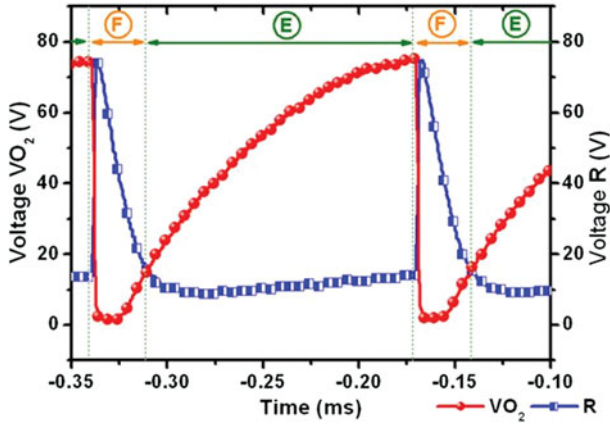


Fig. 3. Evolution of the voltage across the pattern of  $\text{VO}_2$  (round symbols) and across the series resistance (squared symbols) during a period of oscillation for a device incorporating a  $\text{VO}_2$  pattern of  $350\text{-}\mu\text{m}$ -long and  $50\text{-}\mu\text{m}$ -wide, heated to  $50^\circ\text{C}$ .

Regarding the second NDR region (NDR2) of the device  $I$ - $V$  characteristic, for the excitation circuit we used, we were not able to identify the onset of electrical oscillations. A possible explanation is that this NDR2 is not intrinsic to the  $\text{VO}_2$  material as is the NDR1, but rather is circuit dependent. When increasing the current along the  $I$ - $V$  characteristic, at the end of the NDR1, the component has a negative resistance that largely compensates that of the series resistance,  $R_S$ . Further increasing the current will decrease (in absolute value) this negative resistance until the point where  $R_S$  will become larger (at the end of NDR2). After this point, the component will enter an ohmic regime (metallic region in Fig. 1(b)). However, it is possible to initiate oscillations also in this NDR2 zone, by integrating in the excitation circuit additional elements ( $R$ ,  $C$ , and  $L$  components).

### C) Voltage-induced self-oscillations in the $\text{VO}_2$ devices

In the voltage-excitation mode, the oscillatory phenomenon seems more difficult to initiate although the oscillating mechanism is the same as for the current mode. As already demonstrated [4, 12], the appearance of the oscillating phenomenon is conditioned by specific ranges of excitation voltage and series resistance in the circuit, as shown in Fig. 4. In agreement with previous results [4, 12], we obtained a specific “window” in the applied voltage series resistance diagram for which the onset of the self-oscillating phenomenon is possible. The properties and the shape of the oscillations are similar to those obtained for the current-activation mode. We note that the oscillations do not occur for low series resistances,  $R_S$ , but only for specific values. In fact, the couple “applied voltage”-“series resistance” defines a load-line in the circuit which, if properly chosen, will intercept the  $I$ - $V$  characteristics at current values corresponding to the NDR1 and thus, initiating the self-oscillating mechanism.

### D) Self-oscillation’s amplitude and frequency dependence on excitation parameters

We investigated the influence of the excitation amplitude (for both current- or voltage-activation modes) on the amplitude

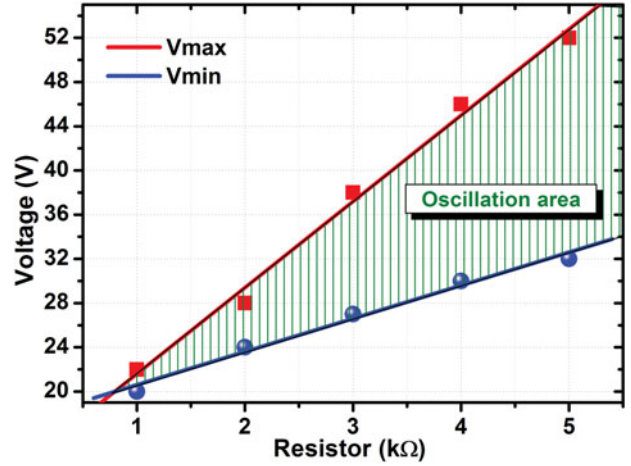


Fig. 4. Evolution of the voltage range where oscillations are observed as a function of the series resistance on a device with a  $\text{VO}_2$  pattern  $25 \times 18\text{ }\mu\text{m}^2$ .

and frequency of the self-oscillating phenomenon appearing across the  $\text{VO}_2$ -based devices. The two graphs in Fig. 5 show that for both activation modes, an increase in the excitation current or voltage (in the limits imposed by the NDR1) results in an increase in the oscillation frequencies and slightly reduces their amplitudes. In both cases, these

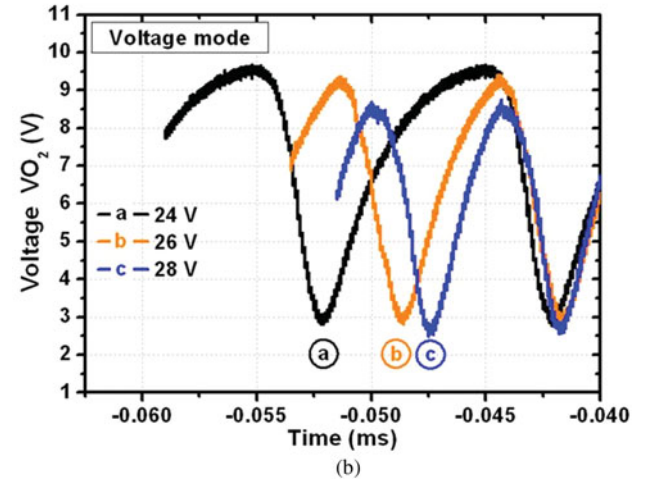
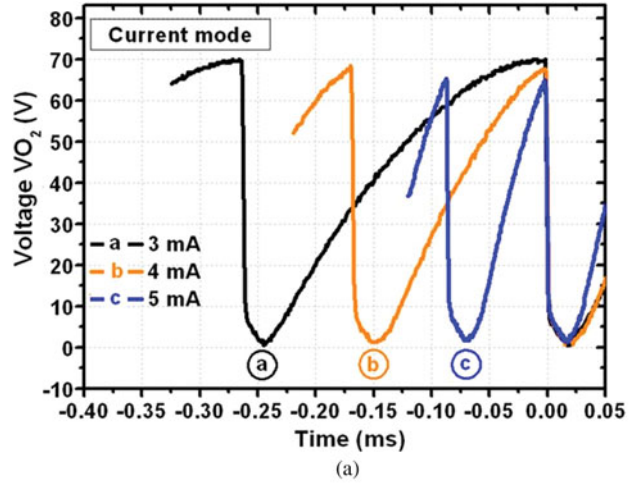


Fig. 5. (a) Self-oscillations observed during the application of DC currents of different values in the NDR1 of the  $I$ - $V$  characteristic of a device with a  $\text{VO}_2$  pattern of  $350 \times 50\text{ }\mu\text{m}^2$  and (b) self-oscillations observed for different voltage values for a  $\text{VO}_2$  pattern of  $25 \times 18\text{ }\mu\text{m}^2$ .

variations can be explained by the percolative mechanism responsible for the onset of self-oscillations: if the applied voltage or current increases, the proportion of metallic domains within the insulating material increases causing a decrease in the device resistivity and possibly in its overall capacitance. Since the oscillating phenomenon is governed by an RC-type time constant (the rising part of the VO<sub>2</sub> voltage oscillations), the frequency will decrease with decrease in the time constant  $\tau = RC$ .

Another important parameter affecting the oscillations properties is the device temperature. Increasing the temperature of the VO<sub>2</sub> device will result in an increase in the oscillation frequencies and in a more marked decrease of their amplitudes for both current- and voltage-induced oscillations (Figs 6(a) and 6(b), respectively). This behavior can be simply explained by a decrease of the initial device resistivity with temperature (the initial  $\tau = RC$  time constant decreasing consequently with the temperature). It is also worth noting that above 68°C (temperature transition of the VO<sub>2</sub> material), no oscillating phenomenon occurs, since the material is totally transformed to its metallic state and its  $I$ - $V$  characteristic is typical of a resistance (ohmic type).

The impact of the series resistances in the excitation circuit on the characteristics of the oscillations was also investigated, for both excitation modes. In the case of current-induced self-oscillations  $R_S$  has little impact on the oscillation frequencies

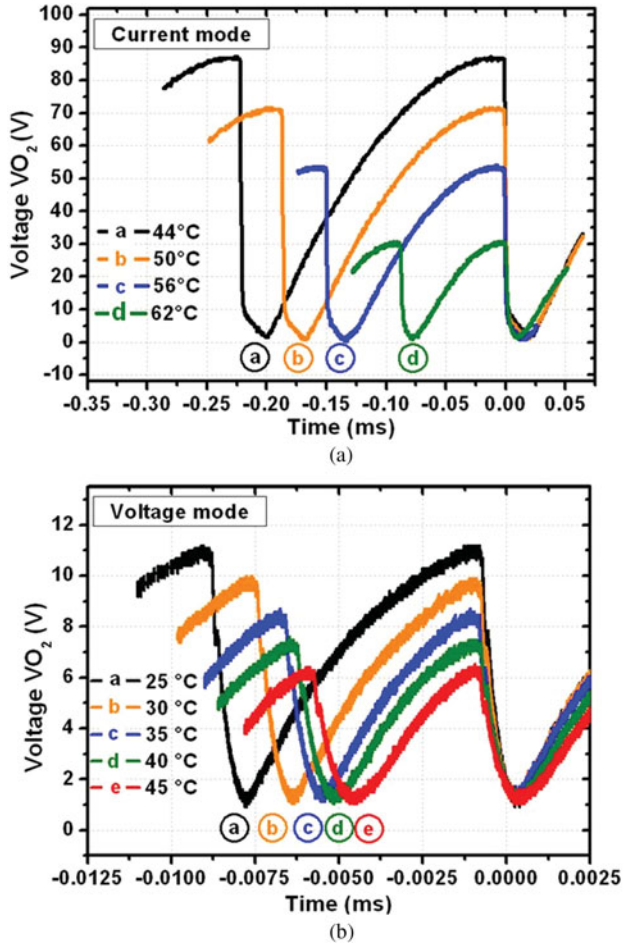


Fig. 6. (a) Self-oscillations observed in a device with a VO<sub>2</sub> pattern of  $350 \times 50 \mu\text{m}^2$  for different temperatures in the case of a DC current (3 mA) and (b) in the case of a voltage of 35 V on a VO<sub>2</sub> pattern of  $25 \times 18 \mu\text{m}^2$ .

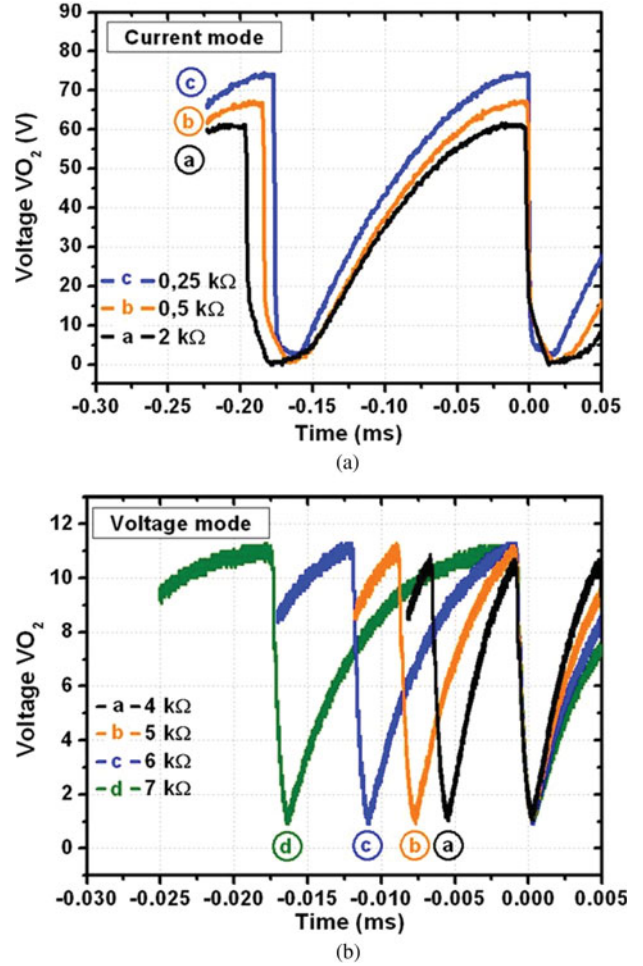


Fig. 7. (a) Self-oscillations observed in a device incorporating a VO<sub>2</sub> pattern of  $350 \times 50 \mu\text{m}^2$  for different values of resistance during the application of a DC current of and (b) in the case of a voltage of 35 V on a VO<sub>2</sub> pattern of  $25 \times 18 \mu\text{m}^2$ .

and affects moderately the oscillations amplitudes (Fig. 7(a)): the frequencies are slightly increased and the amplitude tends to increase as  $R_S$  grows stronger. Instead, for the voltage-induced self-oscillations mode, the increase in the values of the series resistance will slightly reduce the oscillations amplitudes but will strongly affect the frequencies of oscillations, decreasing them. It is relatively difficult to explain this phenomenon for the voltage-activated mode, but intuitively, a modification of the  $R_S$  (within the limits imposed by the oscillation window shown in Fig. 4) will affect the way the load-line (applied voltage-series resistance) excites the NDR region of the device.

#### IV. CONCLUSIONS

In conclusion, we demonstrated electrical self-oscillations generation in simple 2 T VO<sub>2</sub>-based devices using their NDR properties, in both current- or voltage-activated modes. The physical mechanism explaining the onset of the oscillating phenomenon can be explained by the dynamic percolative occurrence of metallic and isolating nano-domains within the VO<sub>2</sub> material during excitation which makes the device behave like a charging capacitor. We demonstrated that, for both excitation modes, the oscillation amplitude

and frequencies can be controlled by the values of the continuous excitation signal, the circuit parameters, the geometrical parameters of the devices, and by external parameters such as temperature. Work is in progress for expanding the oscillation frequencies of the presented devices toward higher values (in the RF/microwave frequency domains) by coupling them with external RLC (resistance-inductance-capacitance) resonators or designing in-plane metal-insulator-metal (MIM)-type devices. The results presented here can provide simple, innovative solution for applications in the oxide electronics field: on-chip, highly integrated inverters and on-chip oscillators, a.c. signal generators for integrated nano-devices, extremely sensitive pressure/position and temperature sensors, etc.

## ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the ANR France under project "Admos-VO<sub>2</sub>", ANR 07-JCJC-0047.

## REFERENCES

- [1] Gevorgian, S.: Tuneable materials for agile microwave devices, in 38th European Microwave Conf., Amsterdam, The Netherlands, 2008, paper WVE6-6, 1–34.
- [2] Morin, F.J.: Oxides which show a metal-to-insulator transition at the Neel temperature. *Phys. Rev. Lett.*, **3** (1959), 34–36.
- [3] Stefanovich, G.; Pergament, A.; Stefanovich, D.: Electrical switching and Mott transition in VO<sub>2</sub>. *J. Phys.: Condens. Matter.*, **12** (2000), 8837–8845.
- [4] Kim, H.T. et al.: Electrical oscillations induced by the metal-insulator transition in VO<sub>2</sub>. *J. Appl. Phys.*, **107** (2010), 023702.
- [5] Cavalleri, A. et al.: Femtosecond structural dynamics in VO<sub>2</sub> during an ultrafast solid-solid phase transition. *Phys. Rev. Lett.*, **87** (2001), 237401.
- [6] Kikuzuki, T.; Lippmaa, M.: Metal-insulator transition characteristics of VO<sub>2</sub> thin films grown on Ge(100) single crystals. *Appl. Phys. Lett.*, **96** (2010), 132107.
- [7] Dumas-Bouchiat, F.; Champeaux, C.; Catherinot, A.; Crunteanu, A.; Blondy, P.: RF-microwave switches based on reversible semiconductor-metal transition of the VO<sub>2</sub> thin films synthesized by pulsed-laser deposition. *Appl. Phys. Lett.*, **91** (2007), 223505.
- [8] Choi, S.B. et al.: Nanopattern enabled terahertz all-optical switching on vanadium dioxide thin film. *Appl. Phys. Lett.*, **98** (2011), 071105.
- [9] Dumas-Bouchiat, F.; Champeaux, C.; Catherinot, A.; Givernaud, J.; Crunteanu, A.; Blondy, P.: RF microwave switches based on reversible metal-semiconductor transition properties of VO<sub>2</sub> thin films: an attractive way to realise simple RF microelectronic devices, in materials and devices for smart systems III, in *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* vol. 1129, Warrendale, PA, 2009, 275–286.
- [10] Bouyge, D. et al.: Reconfigurable bandpass filter based on split ring resonators and vanadium dioxide (VO<sub>2</sub>) microwave switches, in Asia-Pacific Microwave Conf., Singapore, 2009, 2332–2335.
- [11] Givernaud, J. et al.: Microwave power limiting devices based on the semiconductor-metal transition in vanadium-dioxide thin films. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, **58** (2010), 2352–2361.
- [12] Sakai, J.: High-efficiency voltage oscillation in VO<sub>2</sub> planar-type junctions with infinite negative differential resistance. *J. Appl. Phys.*, **103** (2008), 103708.
- [13] Crunteanu, A. et al.: Voltage- and current-activated metal-insulator transition in VO<sub>2</sub>-based electrical switches: a lifetime operation analysis. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **11** (2010), 065002 (6pp).
- [14] Chang, Y.J. et al.: Phase coexistence in the metal-insulator transition of a VO<sub>2</sub> thin films. *Thin Solid Films*, **486** (2005), 46–49.
- [15] Rozen, J.; Lopez, R.; Haglund, R.F.; Feldman, L.C.: Two-dimensional current percolation in nanocrystalline vanadium dioxide films. *Appl. Phys. Lett.*, **88** (2006), 081902.
- [16] Kishida, H.; Ito, T.; Nakamura, A.; Takaishi, S.; Yamashita, M.: Current oscillation originating from negative differential resistance in one-dimensional halogen-bridged nickel compounds. *J. Appl. Phys.*, **106** (2009), 016106.
- [17] Mori, T.; Bando, Y.; Kawamoto, T.; Terasaki, I.; Takimiya, K.; Otsubo, T.: Giant nonlinear conductivity and spontaneous current oscillation in an incommensurate organic superconductor. *Phys. Rev. Lett.*, **100**, (2008), 037001.



**Jonathan Leroy** received the Master's degree in electronics from the University of Limoges, Limoges, France, in 2010. He is currently working toward obtaining his Ph.D. at the University of Limoges. Since 2010, he is with the XLIM Research Institute, CNRS/University of Limoges. His research interests include the study of smart materials (mainly VO<sub>2</sub>) and their applications in RF/microwave and THz devices.



**Aurelian Crunteanu** received the Phys. Eng. Degree in optics and optical technologies, Master's degree, and Ph.D. degree in physics from the University of Bucharest, Bucharest, Romania, in 1995, 1996, and 2000, respectively, and the Ph.D. degree in material sciences from the Claude Bernard University, Lyon 1, France, in 2001. From 2001 to 2003, as a Post-Doctoral Fellow with the Institute of Imaging and Applied Optics, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland, his research was oriented to the fabrication and characterization of micro- and nanostructures in laser host materials, and laser-assisted thin-film deposition. Since 2003, he is a Researcher with the Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), XLIM Research Institute, University of Limoges, France. His current research activities are focused on the development of new materials for microelectronics and optics, RF-MEMS reliability, and optical switching using MEMS technology.



**Julien Givernaud** received the Bachelor degree in material science from the Engineering National School of Limoges (ENSIL), France, in 2006, and he is currently working for obtaining his Ph.D. at the University of Limoges. Since 2007, he is with the XLIM Research Institute, CNRS/University of Limoges. His research interests include the integration of smart materials (mainly VO<sub>2</sub>) in RF microwave devices.





**Jean-Christophe Orlianges** received the Ph.D. degree in material sciences from the University of Limoges, Limoges, France, in 2003. From 2008 to 2009, he was with the “Centre National de la Recherche Scientifique” (CNRS), as a Research Engineer with XLIM Laboratory. He is currently an Assistant Professor with the Faculty of Science,

University of Limoges. He conducts research with the “Sciences des Procédés Céramiques et de Traitements de Surface” (SPCTS) Laboratory, Unité Mixte de Recherche (UMR) 6638, CNRS/University of Limoges. His main research interests include pulsed-laser thin-films deposition techniques, nanostructured materials, development, and integration of new materials in electronic and optic devices.



**Corinne Champeaux** received the Ph.D. degree in electrical engineering from the University of Limoges, Limoges, France, in 1992. Since 1992, she has been an Assistant Professor with the Faculty of Science, University of Limoges. She currently conducts research with the Sciences des Procédés Céramiques et de Traitements de Surface (SPCTS) Laboratory, Unité Mixte de Recherche (UMR) 6638, Centre

National de la Recherche Scientifique (CNRS), University of Limoges. Her main research interests are laser-matter interactions and pulsed-laser thin-films deposition techniques. She is involved with the development and fabrication of MEMS components through the elaboration of new materials and fabrication processes.



**Pierre Blondy** (M’00) received the Ph.D. and Habilitation degrees from the University of Limoges, Limoges, France, in 1998 and 2003, respectively. From 1998 to 2006, he was with the Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), as a Research Engineer with XLIM Laboratory, where he began research on RF-MEMS technology and

applications to microwave circuits. He is currently a Professor at the University of Limoges, leading a research group on RF-MEMS. He was a visiting researcher at the University of Michigan, Ann Arbor, USA in 1997 and at the University of California at San Diego, La Jolla, USA in 2006 and 2008. Dr Blondy was an Associate Editor for the *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* in 2006. He is a member of the IEEE International Microwave Conference Technical Program Committee since 2003.

### 2.2.3. COMMUTATEURS OPTIQUES BASES SUR LA COMMUTATION ELECTRIQUE DES DISPOSITIFS A DIOXYDE DE VANADIUM [31]

Dans les parties précédentes du manuscrit nous avons montré que pendant le cycle de transition MIT la résistivité électrique des films de  $\text{VO}_2$  peut diminuer de plusieurs ordres de grandeur. En même temps, d'un point de vue optique, le matériau passe d'un état transparent (phase semi-conductrice) à un état hautement réfléchissant (phase métallique) sur une large bande spectrale allant de l'infrarouge proche jusqu'aux fréquences THz. Comme mentionné auparavant, cette transition ultra- rapide peut être induite par différentes excitations externes (changement de température, excitation optique ou encore électrique par injection de porteurs).

Dans le **domaine de la commutation optique** nous avons donc utilisé ce changement de réflectivité d'un film  $\text{VO}_2$  déclenché électriquement pour la réalisation de micro- miroirs à réflectivité variable (commutateurs optiques rapides, voir Figure 2.16) pour une large gamme d'applications (modulateurs optiques pour le déclenchement des impulsions laser ultra- brèves en régime Q-switch ou en régime de synchronisation des modes longitudinaux, commutateurs optiques etc.). Nous avons mis en évidence ***pour la première fois le changement ultra-rapide de transmission/ réflectivité*** d'un commutateur optique à base de  $\text{VO}_2$ , ***obtenu entièrement par un actionnement électrique***.

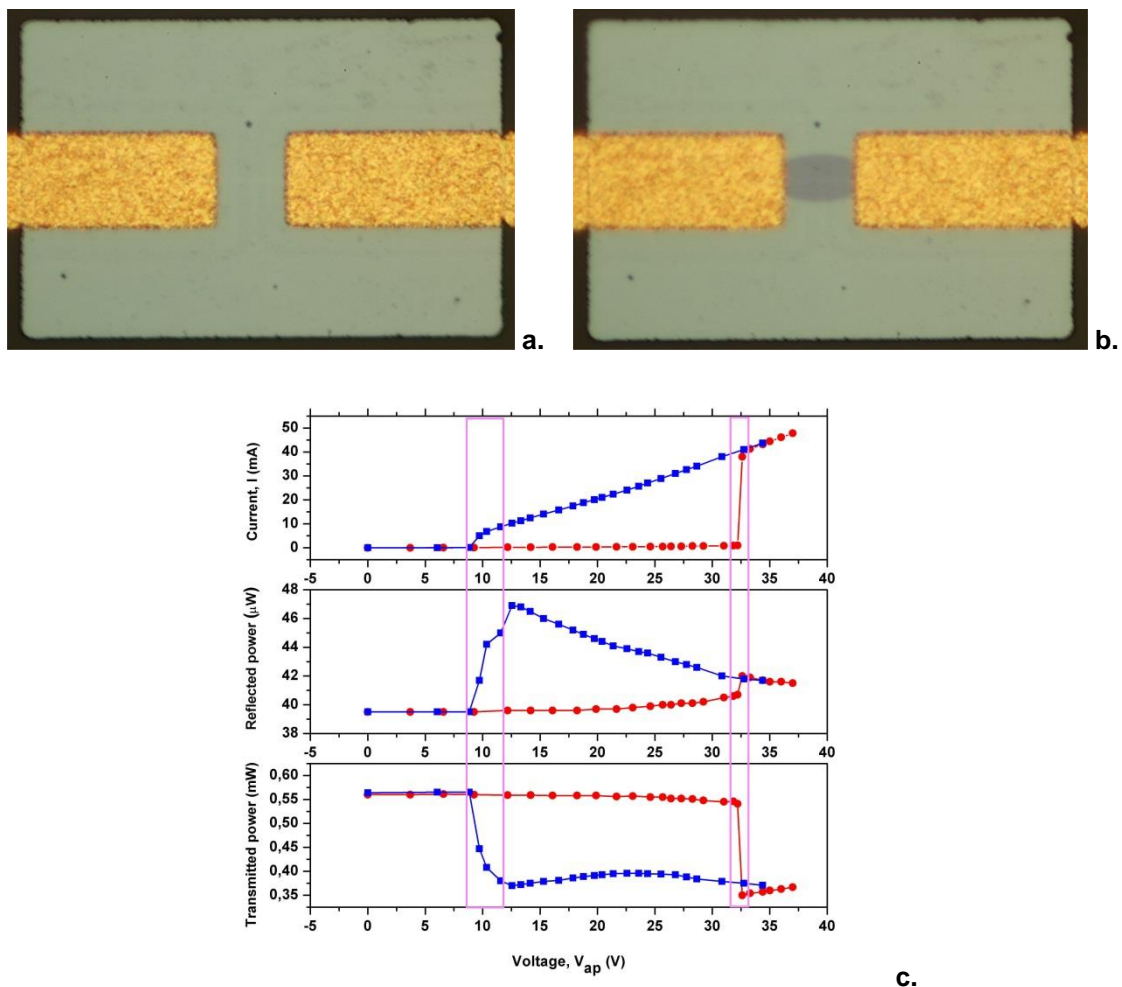


Figure 2.16. Exemple typique d'un commutateur optique à deux contacts électriques à base de films  $\text{VO}_2$  non- actionné (a.) et actionné (b.) et ses réponses (variation de la réflectivité et de la transmission à  $1.55 \mu\text{m}$ ) en fonction de la tension appliquée (c.).

Pour cela, nous avons mesuré la variation temporelle de la réflectivité de ce film soumis à une sollicitation électrique périodique (Figure 2.17). L'échantillon de VO<sub>2</sub> est éclairé par une source laser fonctionnant en régime continu, de longueur d'onde d'émission 1550 nm choisie dans la plage où la variation de réflectivité, ou de transmission, est la plus significative. Une photodiode est placée derrière l'échantillon pour collecter la lumière transmise.

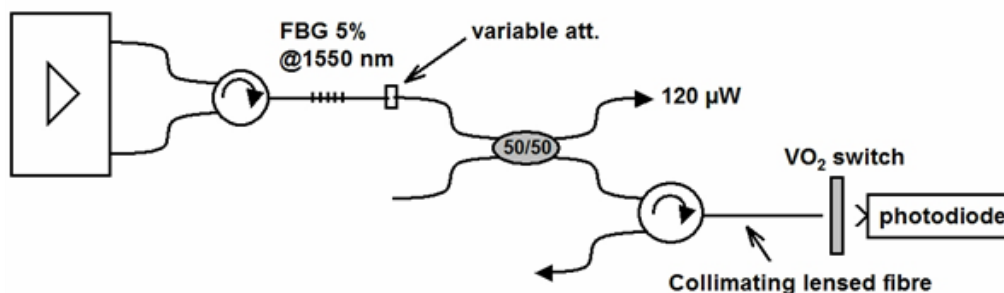


Figure 2.17. Dispositif de mesure de la variation de transmission/ réflexion lors de la transition MIT d'un commutateur électrique 2T à base de VO<sub>2</sub>.

Sur la Figure 2.18 nous avons tracé pour un composant 2T représentatif, les allures de la tension appliquée aux électrodes de l'échantillon (courbe noir), de la réponse électrique (tension sur le motif de VO<sub>2</sub>, courbe rouge), et du signal optique recueilli derrière l'échantillon (transmission à travers l'échantillon lors de la commutation électrique, courbe en vert) en fonction du temps. On remarque ainsi la variation rapide de la transmission optique du composant, synonyme du changement de phase du matériau.

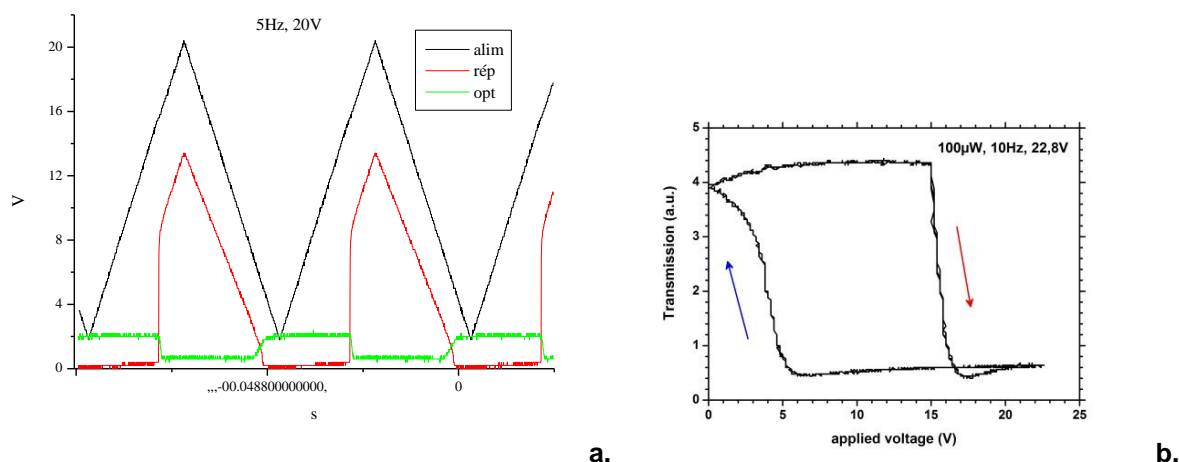


Figure 2.18. a. Signal périodique actionnant le dispositif 2T à VO<sub>2</sub> (courbe noir) et ses réponses électrique (courbe rouge) et en transmission optique (courbe verte). b Réponse dynamique de la transmission du dispositif lors de l'actionnement électrique du motif à VO<sub>2</sub>.

Actuellement, nous poursuivons la caractérisation temporelle de la transition de phase du matériau, à partir de mesures optiques. Nous envisageons notamment de distinguer les sollicitations volontaires (électrique ou optique par exemple) de celles qui sont parasites (échauffement du matériau par effet Joule), pouvant conduire à l'augmentation du temps de transition ou encore à la chute du contraste observé en transmission. En effet, les très courts temps de commutation accessibles pour ce matériau, évoqués ci-dessus, laissent présager d'un fort potentiel de ce composant pour la modulation optique, que nous souhaiterions montrer très prochainement. Ces recherches préliminaires concernant l'utilisation dans le domaine optique du matériau VO<sub>2</sub> ont vocation à se développer plus amplement, à la fois au niveau de l'actionnement optique du matériau mais aussi au niveau de la conception de nouveaux dispositifs tel que des filtres et miroirs de Bragg accordables etc.



## 2.3 INTEGRATION DE FILMS DE VO<sub>2</sub> DANS DES GUIDES COPLANAIRES MICRO-ONDES (CPW)

Dans la suite de ce manuscrit, nous présentons les réalisations expérimentales de commutateurs dans le domaine de fréquences micro-ondes (en configuration série ou parallèle), basées sur le principe de transition réversible semi-conducteur- métal de matériaux à transition de Mott type VO<sub>2</sub>. Cette transition MIT, initiée thermiquement ou électriquement, est utilisée ici pour modifier la transmission sur une large bande de fréquence d'un signal micro-onde se propageant dans un guide d'onde coplanaire chargé par une couche mince de VO<sub>2</sub>. Nous montrons que cette technologie est très prometteuse pour la conception de dispositifs et systèmes reconfigurables pour des applications qui nécessitent des vitesses de commutations et des niveaux de puissances élevées (antennes reconfigurables, systèmes accordables etc.).

### 2.3.1 CONCEPTION ET REALISATION DE COMMUTATEURS DANS LE DOMAINE MICRO-ONDE : ACTIONNEMENT THERMIQUE ET ELECTRIQUE [18, 19]

Les commutateurs micro-ondes ont été réalisés en utilisant les procédés classique de la micro-technologie (photolithographie optique, dépôts et gravure de diélectriques et métaux), en intégrant des couches minces de VO<sub>2</sub> sur des guides coplanaires micro-ondes (CPW) en configuration série ou en configuration parallèle. Les géométries des commutateurs réalisés sont présentées sur la Figure 2.19. Dans la configuration parallèle, le guide coplanaire micro-onde est "chargé" par une structure en film mince de VO<sub>2</sub> de manière à ce que les gaps entre la ligne de signal RF et les lignes de masses soient recouverts par le film de VO<sub>2</sub> (Figure 2.19a). Dans la configuration série, les deux parties d'une ligne coplanaire discontinue sont reliées par le film de VO<sub>2</sub> (Figure 2.19b).

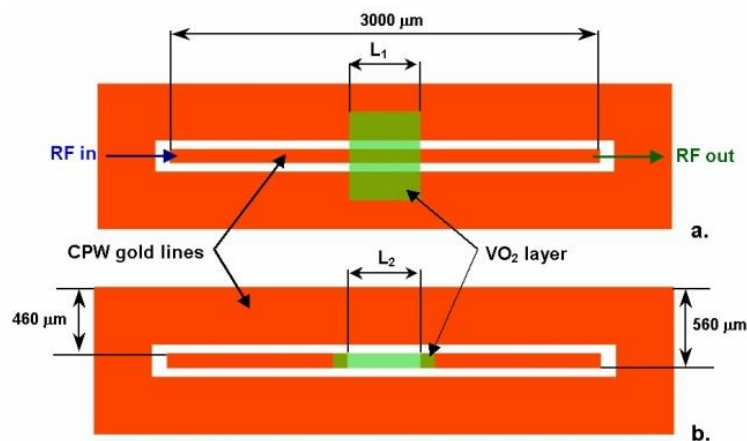


Figure 2.19. Schéma de principe des commutateurs en configuration parallèle (a) et série (b) à base de motifs de VO<sub>2</sub>.

Nous avons étudié des composants avec des motifs de VO<sub>2</sub> de différentes épaisseurs (100 et 200 nm) et dimensions (le paramètre L<sub>1</sub> varie entre 150 et 1000 μm, et le paramètre L<sub>2</sub> varie entre 100 et 500 μm). Les composants ont été réalisés sur des substrats de Si haute- résistivité oxydés (525 μm, épaisseur SiO<sub>2</sub> ~1 μm) ou sur des substrats de saphir type C, en utilisant les techniques classiques de photolithographie. Les lignes CPW ont été réalisées en or (150 nm d'épaisseur) par évaporation thermique. Il s'ensuit le dépôt de VO<sub>2</sub> par ablation laser réactive puis la gravure du film pour former les zones actives du circuit (motifs de VO<sub>2</sub>). Pour minimiser les pertes RF des lignes de transmission, la structure métallique des composants a été ensuite épaissie jusqu'à ~1 μm avec un deuxième dépôt

d'or (évaporation thermique suivie d'une électrolyse de l'or). Un exemple de réalisation pour les deux types de circuits est présenté sur la Figure 2.20.

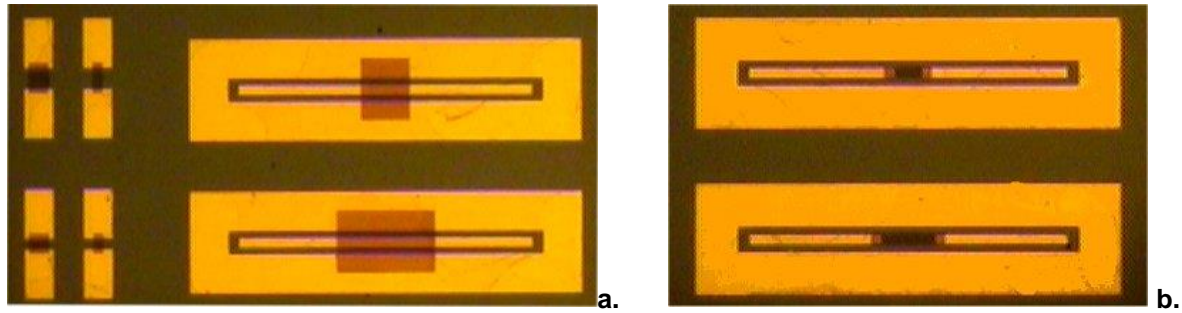


Figure 2.20. Photographies de commutateurs micro-ondes fabriqués en configuration parallèle (a) et série (b).

Les composants ont été mesurés sur un banc de mesure RF réglé en température (précision de 0.2 °C). Les mesures électriques montrent que la résistivité des films de VO<sub>2</sub> (100 nm d'épaisseur) réalisés sur des substrats SiO<sub>2</sub>/Si diminue d'au moins de 2 ordres de grandeur entre la température ambiante ( $\rho = 5.4 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$  à ~300 K) et une température supérieure à la température de transition TSM ( $\rho = 3.8 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$  à 360 K). Les films de VO<sub>2</sub> déposés dans les mêmes conditions, mais sur des substrats de saphir c présentent un changement de résistivité plus important, de trois ordres de grandeurs entre les deux états (semi-conducteur- métal). La très bonne qualité des films obtenus sur des substrats de saphir est liée à un meilleur accord de maille cristalline entre le saphir et la couche VO<sub>2</sub>.

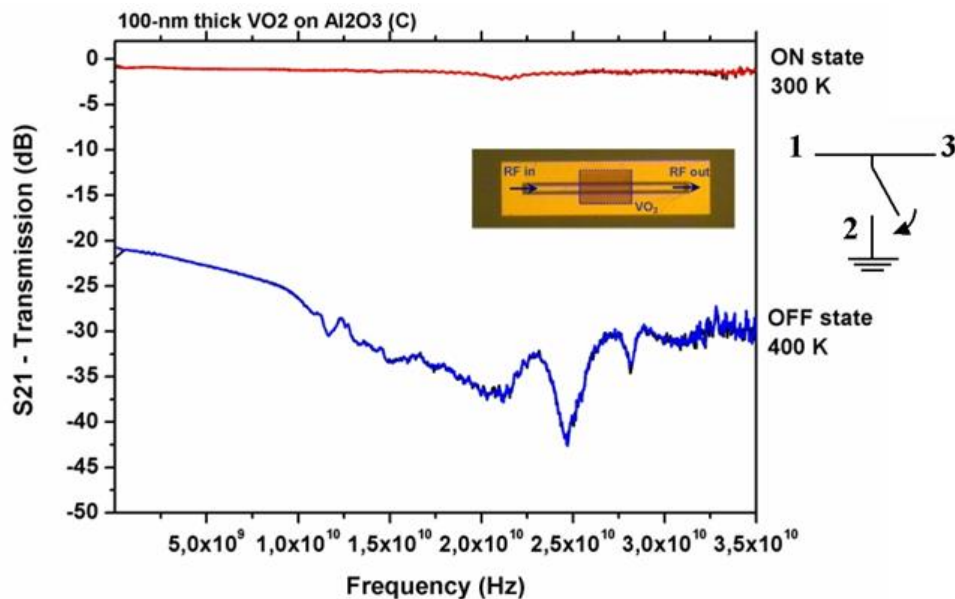


Figure 2.21. Variation de la transmission S<sub>21</sub> pour un commutateur à VO<sub>2</sub> (configuration parallèle, épaisseur du film 100 nm, largeur du film L<sub>1</sub>= 1000 μm) entre l'état passant (à 300 K) et l'état bloqué (400 K).

La dépendance de la transmission du CPW (paramètre S<sub>21</sub>) en fonction de la fréquence pour un commutateur à VO<sub>2</sub> quand la température passe de 300 K à 400 K est montrée sur la Figure 2.21. L'ajout du motif de VO<sub>2</sub> sur les lignes d'or introduit peu de pertes (~0.8 dB) lorsque celui-ci est dans son état semi-conducteur (température ambiante, 300 K). Lorsque la température dépasse 68°C, le VO<sub>2</sub> devient métallique avec comme conséquence une forte atténuation sur une large bande de fréquences (supérieure à 20 dB de 4 à 35 GHz).

Une évolution similaire des paramètres  $S_{21}$  pour un commutateur série typique (paramètre  $L_2 = 500 \mu\text{m}$ ) mais réalisé avec une couche de  $\text{VO}_2$  d'épaisseur 200 nm est présenté sur la Figure 2.22.

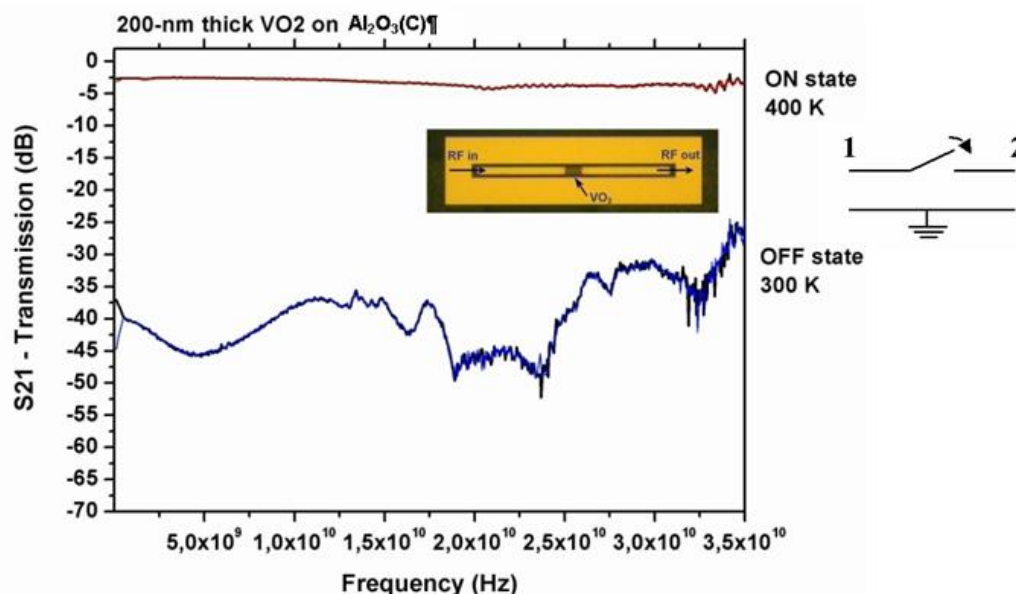
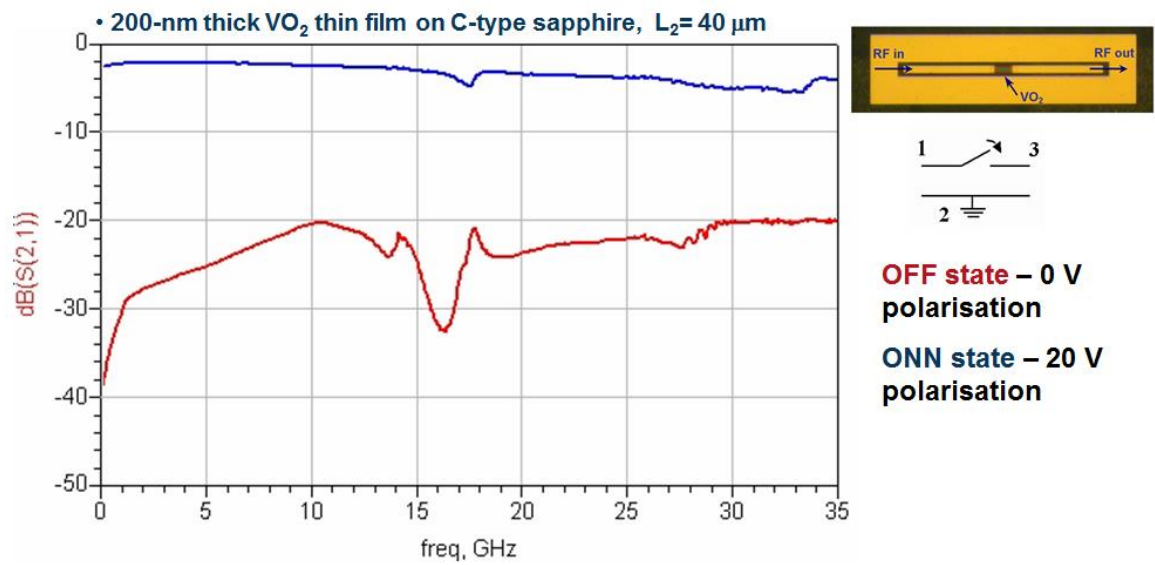


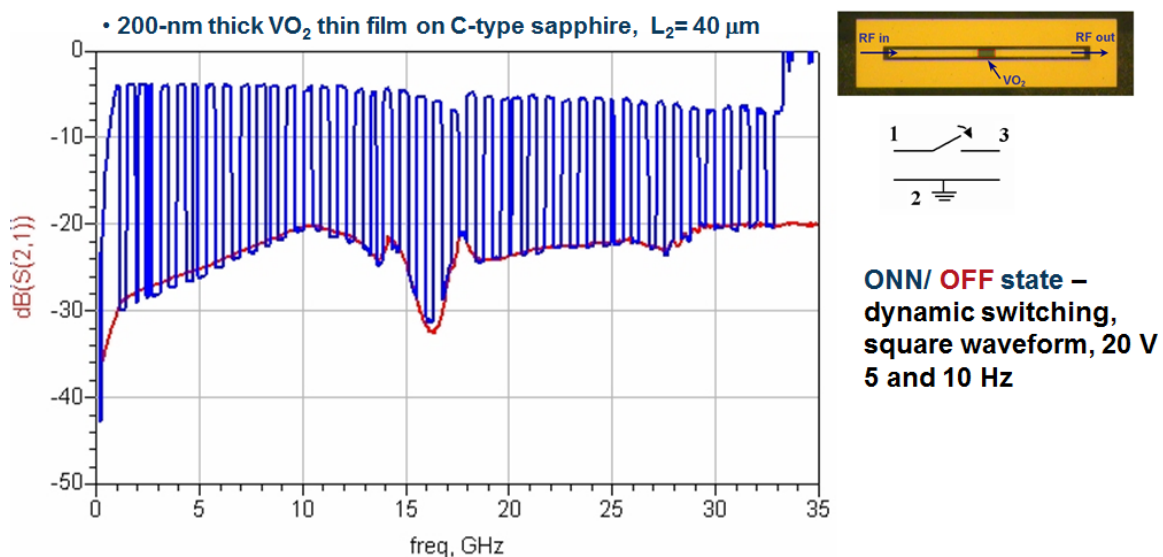
Figure 2.22. Variation de la transmission  $S_{21}$  pour un commutateur à  $\text{VO}_2$  (configuration série, épaisseur du film 200 nm,  $L_2 = 500 \mu\text{m}$ ) entre l'état bloqué (à 300 K) et l'état passant (400 K).

A température ambiante (300K), le motif de  $\text{VO}_2$  possède une grande résistivité et bloquent la propagation du signal micro-ondes (atténuation supérieure à 20 dB sur tout le domaine de mesure), les commutateurs sont dans l'état bloqué (état OFF). Lorsque la température augmente à 400 K, les films deviennent métallique, avec une forte diminution de résistivité, permettant le passage du signal micro-ondes : le commutateur devient passant (état ON). Nous observons également une nette différence entre les pertes d'insertion pour les commutateurs réalisés sur des substrats différents (8-9 dB pour le commutateur réalisé sur substrat  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  et 2-3 dB pour le commutateur réalisé sur saphir type C), témoignant de la qualité différente des couches de  $\text{VO}_2$  (cristallinité, transition de phase), en fonction du substrat.

Nous avons également étendu ce concept de commutation pour réaliser des dispositifs similaires mais en utilisant un actionnement électrique. Ceci permet la réalisation de commutateurs plus fonctionnels (sans utiliser une source d'excitation thermique pour l'initiation de la transition MIT) et théoriquement, plus rapides de quelques ordres de grandeurs. Nous avons ainsi conçu des commutateurs  $\text{VO}_2$  à l'aide de guides micro-ondes coplanaires en configuration série (Figure 2.23) actionné électriquement en appliquant **une différence de potentiel continue de 20 V** (Figure 2.23a) **ou alternative** (signal carré à 10Hz d'amplitude 20V dans le cas de la Figure 2.23b) entre les deux segments de la ligne de signal RF interrompus par le motif de  $\text{VO}_2$  de 40  $\mu\text{m}$  de long. Le principe de commutation est illustré sur les Figures 2.23 a et b. Quand le matériau  $\text{VO}_2$  est à l'état semi-conducteur, le signal envoyé dans le dispositif est bloqué et le paramètre de transmission  $S_{21}$  descend en-dessous de -20 dB: le commutateur est à l'état OFF. En revanche, lors de l'actionnement électrique à 20V, le  $\text{VO}_2$  devient métallique et le signal envoyé dans le dispositif passe à travers le guide coplanaire, le paramètre de transmission atteint  $\sim -3\text{dB}$  : le commutateur est à l'état ON. Ce concept d'activation électrique a été démontré pour différentes longueurs du motif de  $\text{VO}_2$  (5 à 50  $\mu\text{m}$ ) et pour des fréquences du signal d'activation appliqué allant du DC à 500 Hz.



a.



b.

Figure 2.23. Evolution fréquentielle du paramètre  $S_{21}$  lors de la commutation électrique des commutateurs série CPW à VO<sub>2</sub> : a. état bloqué (courbe rouge) et état passant pour une activation de la transition avec une tension continue de 20 V (courbe bleu) et b. variation périodique de l'état passant lors de l'application sur le motif de VO<sub>2</sub> d'un signal de modulation carré de 100 Hz et 20 V d'amplitude.

Les commutateurs à base de VO<sub>2</sub> que nous avons développés présentent **des propriétés très prometteuses dans le domaine des hautes fréquences** : un contraste élevé entre les deux états de commutation, une bonne isolation, un fonctionnement sur des bandes de fréquence très larges et des temps de commutation potentiellement très courts comparés à ceux des dispositifs MEMS. Ils apparaissent donc comme des candidats potentiels pour la réalisation de commutateurs RF simples et efficaces qui pourront être intégrés dans de dispositifs plus complexes pour les applications dans le domaine des télécommunications.



# rf-microwave switches based on reversible semiconductor-metal transition of VO<sub>2</sub> thin films synthesized by pulsed-laser deposition

F. Dumas-Bouchiat,<sup>a)</sup> C. Champeaux, and A. Catherinot  
SPCTS UMR 6638 CNRS, University of Limoges, 123 Av A. Thomas, 87060 Limoges, France

A. Crunteanu and P. Blondy  
XLIM UMR 6172 CNRS, University of Limoges, 123 Av A. Thomas, 87060 Limoges, France

(Received 14 September 2007; accepted 30 October 2007; published online 27 November 2007)

Microwave switching devices based on the semiconductor-metal transition of VO<sub>2</sub> thin films were developed on two types of substrates (*C*-plane sapphire and SiO<sub>2</sub>/Si), and in both shunt and series configurations. Under thermal activation, the switches achieved up to 30–40 dB average isolation of the radio-frequency (rf) signal on 500 MHz–35 GHz frequency band with weak insertion losses. These VO<sub>2</sub>-based switches can be electrically activated with commutation times less than 100 ns, which make them promising candidates for realizing efficient and simple rf switches. © 2007 American Institute of Physics. [DOI: 10.1063/1.2815927]

Vanadium dioxide<sup>1</sup> is an attractive material exhibiting an abrupt and reversible semi-conductor to metal (SC-M) transition at a critical temperature  $T_i \approx 341$  K.<sup>2</sup> Below  $T_i$ , VO<sub>2</sub> single crystal have a monoclinic structure and a classical semiconducting behavior with a band gap around 1 eV, a resistivity of 20  $\Omega$  cm, and a near infrared (IR) transmission of 70%–80%.<sup>2–5</sup> Above 341 K, the structure of vanadium dioxide changes to tetragonal and presents remarkable metallic behavior with a weak resistivity,  $<10^{-5}$   $\Omega$  cm, and a near IR transmission of 0%–5%.<sup>3–5</sup> The VO<sub>2</sub> SC-M transition can be also stimulated by other excitations such as electrical<sup>5–7</sup> and optical<sup>8–10</sup> (charge injection), and in these cases, very fast transitions (less than 1 ps) can be achieved. This makes vanadium dioxide a promising material for switching operations in the rf-microwave domains as demonstrated by recent numerical simulations.<sup>11</sup> The aim of this letter is to demonstrate experimentally the operating properties of rf switching functions by taking advantage of the VO<sub>2</sub> reversible SC-M transition properties.

VO<sub>2</sub> thin films were deposited using reactive pulsed laser deposition (PLD) from a high purity grade (99.95%) vanadium metal target. According to the large number of distinct phases in the vanadium oxide system from V<sub>4</sub>O to V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, careful optimization of the working parameters is necessary to obtain thin films of the pure VO<sub>2</sub> stabilized phase without any posttreatment. The experimental setup was described elsewhere<sup>12</sup> (KrF laser, wavelength of 248 nm, pulse duration of 25 ns, and repetition rate of 10 Hz). Stabilized VO<sub>2</sub> phase is found in the as-deposited films for an ambient oxygen pressure maintained at  $2.2 \times 10^{-2}$  mbar, a laser fluence fixed at 3 J/cm<sup>2</sup> and a substrate temperature of 773 K. Since it has a relatively low lattice parameter mismatch (4.5%) compared to VO<sub>2</sub> monoclinic phase, monocristalline Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(*C*) is a good candidate to deposit mono-oriented VO<sub>2</sub> films.<sup>13</sup> Indeed, x-Ray diffraction ( $\theta$ ,  $2\theta$ ) investigations performed on VO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(*C*) reveals two distinct peaks near 40.2° and 86.8° corresponding, respectively, to the (020) and (040) planes of the monoclinic VO<sub>2</sub> phase. VO<sub>2</sub> films have been also deposited on 1  $\mu$ m SiO<sub>2</sub>/500  $\mu$ m Si substrates using the same experimental conditions. In this case, crystal-

line lattice mismatch is large. Nevertheless, a polycrystallized film growth is observed with an XRD peak near 28.0° corresponding to the (011) planes of VO<sub>2</sub> with an orthorhombic structure. This result agrees well with the observations of Youn *et al.*<sup>14</sup> who show that the VO<sub>2</sub> phase can be stabilized also on an amorphous substrate.

The electrical resistivity of the VO<sub>2</sub> thin films has been recorded during heating-cooling loops in the 300–375 K temperature range for both substrates [SiO<sub>2</sub>/Si and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(*C*)], pointing out typical hysteresis cycles of the reversible SC-M transition, as shown in Fig. 1. For films synthesized on the *C*-type sapphire substrate, the change in the VO<sub>2</sub> resistivity is found to be around three orders of magnitude [ $\rho_{(300)} \sim 5.5 \times 10^{-2}$   $\Omega$  cm down to  $\rho_{(375)} \sim 7.0 \times 10^{-5}$   $\Omega$  cm and  $\xi = \rho_{(375)}/\rho_{(300)} \sim 10^3$  (Fig. 1)], whereas the VO<sub>2</sub> thin films deposited on SiO<sub>2</sub>/Si substrates exhibit a contrast of only two orders of magnitude [ $\rho_{(300)} \sim 5.0 \times 10^{-1}$   $\Omega$  cm down to  $\rho_{(375)} \sim 3.0 \times 10^{-3}$   $\Omega$  cm and  $\xi \sim 10^2$  (inset of Fig. 1)].

Following the VO<sub>2</sub> thin film structural and electrical characterizations, we fabricated switching devices for the rf-microwave frequency domain on the two types of substrates (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(*C*) and Si/SiO<sub>2</sub>). The design of the switching functions is based on a microwave coplanar waveguide (CPW) “charged” by a 200 nm VO<sub>2</sub> thin film structure in two

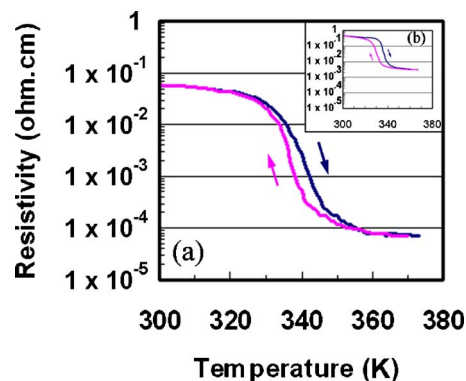


FIG. 1. (Color online) Resistivity vs temperature for a 200 nm thick VO<sub>2</sub> film made by PLD on: (a) *C* type sapphire substrates and (b) (inset) SiO<sub>2</sub>/Si substrates.

<sup>a)</sup>Electronic mail: frederic.dumas-bouchiat@grenoble.cnrs.fr

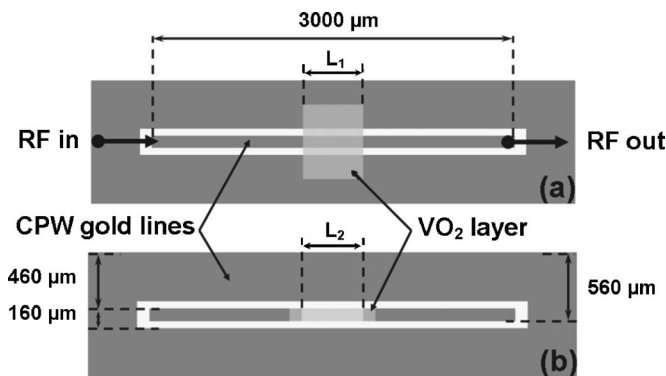


FIG. 2. Microwave switching device design based on  $\text{VO}_2$  thin films: (a) shunt configuration and (b) series configuration.

different geometries (Fig. 2): (a) shunt configuration, in which the gap between the central signal line and the ground line of the CPW is covered by the  $\text{VO}_2$  film [ $150 \mu\text{m} \leq L_1 \leq 1000 \mu\text{m}$  [Fig. 2(a)]] and (b) series configuration, for which the two parts of a discontinuous central rf-microwave signal line are linked together through a  $\text{VO}_2$  film [ $100 \mu\text{m} \leq L_2 \leq 500 \mu\text{m}$  [Fig. 2(b)]]. The substrates are firstly covered by a thermal evaporated gold metal coating ( $\sim 200 \text{ nm}$  in thickness), in which the geometries of the CPW lines are defined using lithography and wet etching. It follows the  $200 \text{ nm}$   $\text{VO}_2$  layer deposition using PLD and its patterning. Finally, the CPW metal lines are thickened (by gold thermal evaporation) up to  $\sim 800 \text{ nm}$  in order to minimize the propagation losses of the microwave signal.

The devices were tested using a temperature-regulated (accuracy of  $0.2 \text{ K}$ ) rf-microwave test bench. Typical results for the two geometries given in Fig. 2 and for the devices realized on  $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{C})$  are reported in Fig. 3. The evolution of the  $S_{21}$  parameter versus frequency (transmission of a rf signal over the CPW line) for a typical  $\text{VO}_2$ -based shunt switch (with  $L_1 = 1000 \mu\text{m}$ ) is plotted in Fig. 3(a), as the temperature is changed from  $300$  to  $400 \text{ K}$ . The addition of the  $\text{VO}_2$  film on the CPW induces low losses ( $\sim 0.8 \text{ dB}$ ) in the signal propagation when the  $\text{VO}_2$  is in its semiconducting state (at  $300 \text{ K}$ ). When the temperature overpass the transition tem-

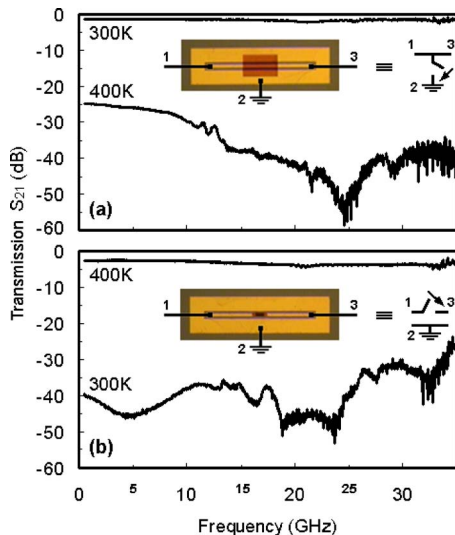


FIG. 3. (Color online) Transmission  $S_{21}$  (decibel) of CPW lines deposited on  $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{C})$ : (a) shunt switch ( $L_1 = 1000 \mu\text{m}$ ) and (b) series switch ( $L_2 = 500 \mu\text{m}$ ).

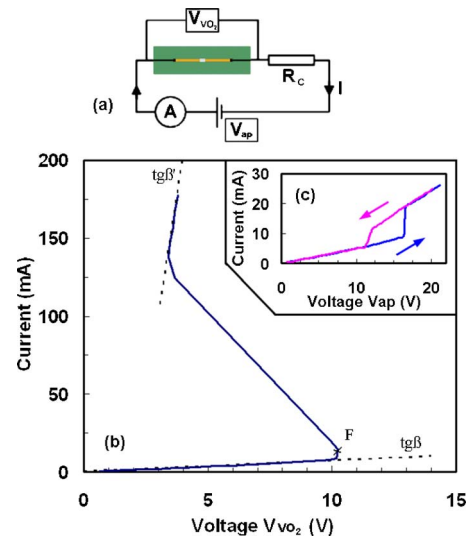


FIG. 4. (Color online) Abrupt SC-M transition induced by a dc voltage in a  $\text{VO}_2$  thin film. (a) Schematic diagram of the electronic circuit used for experiments. (b) Current ( $I$ )-voltage ( $V_{\text{VO}_2}$ ) characteristic (S shape) on the  $\text{VO}_2$  two-probe terminal. (c) Current ( $I$ )-voltage ( $V_{\text{ap}}$ ) characteristic of the electrical circuit.

perature (i.e., at  $400 \text{ K} > 341 \text{ K}$ ), the vanadium dioxide film changes into the metallic state and short circuits the rf signal to the ground. The transmission of the propagating signal is strongly attenuated over a very wide frequency range with attenuation higher than  $25 \text{ dB}$  until  $\sim 12 \text{ GHz}$ , and higher than  $35 \text{ dB}$  from  $13$  to  $35 \text{ GHz}$ . The average attenuation on the total investigated spectral range ( $500 \text{ MHz} - 35 \text{ GHz}$ ) is  $37 \text{ dB}$ . The same measurements have been undertaken for the series-type switches. An example of the evolution of the CPW transmission  $S_{21}$  parameter (with  $L_2 = 500 \mu\text{m}$ ) with frequency is presented in Fig. 3(b). At room temperature, the  $\text{VO}_2$  film blocks the rf signal propagation, with an average attenuation of  $40 \text{ dB}$  on the spectral range of  $500 \text{ MHz} - 35 \text{ GHz}$ . When the temperature goes up to  $400 \text{ K}$ , the metallic character of the  $\text{VO}_2$  allows the signal to be transmitted over the CPW with insertion losses lower than  $\sim 2.5 \text{ dB}$ . The same investigations have been made for devices realized on  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  substrates in both configurations. We obtained similar top performances with an averaged contrast, respectively, of  $-24 \text{ dB}$  (shunt) and  $-25 \text{ dB}$  (series) between the two  $\text{VO}_2$  states, and insertion losses of about  $3 \text{ dB}$  in both configurations. This indicates the high potential and capability of integration of the devices in silicon-based technologies. For all configurations, the reversible switching operation can be observed continuously up to several months pointing out the high reliability of the devices.

Obviously, an electrical activation of the  $\text{VO}_2$  material SC-M transition would allow for much more practical devices and moreover is expected to be several orders of magnitude faster.<sup>15</sup> To investigate the electrical activation, a dedicated two-probe device has been realized on an  $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{C})$  substrate on which a  $200 \text{ nm}$  thick and  $35 \mu\text{m}$  long  $\text{VO}_2$  film was defined between two thick gold lines. The two-probe device has been integrated in the electrical circuit shown in Fig. 4(a) with a current-protective resistance  $R_c = 50 \Omega$ . Assuming that only local joule heating mechanisms take place in  $\text{VO}_2$  (Ref. 16) films when a voltage is applied and considering that the system reaches a stationary regime, a simple



thermal model based on equilibrium between the heat flow and electric power can be written,

$$K(T_{\text{film}} - T_{\text{room}}) = V_{\text{ap}} I, \quad (1)$$

where  $T_{\text{film}}$  and  $T_{\text{room}}$  are, respectively, the equilibrium film and room temperatures,  $K$  is the global constant taking account of the conduction and convection,  $V_{\text{ap}}$  and  $I$  are the voltage and current in the circuit. When  $T_{\text{film}}$  is not too different from  $T_{\text{room}}$ , the material thermal conductivity follows an exponential law  $\sigma(T) = \sigma_{\text{room}} \exp[\alpha(T_{\text{film}} - T_{\text{room}})]$ , where  $\alpha \sim E_a / (kT_{\text{room}}^2)$  ( $E_a$  activation energy and  $k$  Boltzmann constant) and  $\sigma_{\text{room}}$  is the thermal conductivity at  $T_{\text{room}}$ . Eq. (1) leads to

$$\frac{dI}{dV} = \frac{I}{V} \left( \frac{K + \alpha IV}{K - \alpha IV} \right). \quad (2)$$

The  $I=f(V_{\text{VO}_2})$  characteristic shown in Fig. 4(b) underlines a typical S-shape curve with clearly three regimes, for which the first and the second stages are well described by Eq. (2). For low current intensities ( $I_{\text{th}} < 8.2$  mA), a linear dependence is observed, indicating a nearly Ohmic behavior with a weak slope  $tg\beta \sim 7 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$ , the vanadium oxide is in its SC state. Point F [Fig. 4(b)] corresponds to an instability  $IV = K/\alpha$ , where the critical quantities  $V_{\text{th}}$  and  $I_{\text{th}}$  can be calculated. By increasing the voltage over a threshold value of  $V_{\text{th}} = 10.5$  V, a nonlinear zone characterized by a negative differential resistance appears (occurring when  $K/\alpha < IV$ ). Beyond, VO<sub>2</sub> becomes metallic with an Ohmic behavior characterized by a different positive slope  $tg\beta' \sim 0.15 \Omega^{-1}$ . The apparition of two different positive slopes underlines the VO<sub>2</sub> phase transition. The values of the slope ratio (higher than 200) are in agreement with the above-mentioned results of the VO<sub>2</sub> resistivity. When the current is injected in the two-probe device through a resistance  $R_C = 600 \Omega$ ,  $I=f(V_{\text{ap}})$  is represented in Fig. 4(c). When  $V_{\text{ap}}$  is increased over 16 V, an abrupt enhancement of the current clearly occurs (9.2 to 18.9 mA) outlining the SC-M transition. The device remains in the “activated” metallic state as long as the voltage is maintained in the circuit. When  $V_{\text{ap}}$  is reduced down to 11 V, the VO<sub>2</sub> thin film goes back to its original SC state. Whatever the  $R_C$  value is, the measured threshold for  $V_{\text{VO}_2}$  to obtain the SC-M transition is found to be  $V_{\text{th}} = 10.5$  V. The current intensity reaches a typical value of about 8.8 mA which corresponds to a current density of about  $4.6 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup>. This value is in good agreement with the results presented in Refs. 15 and 17, and confirms once more the metallic state of the VO<sub>2</sub> thin film.

In order to evaluate the switching time of the VO<sub>2</sub>-based two-terminal device, we applied in the electrical circuit, as shown in Fig. 4(a), short rectangular voltage pulses with an amplitude  $U$  higher than  $V_{\text{th}}$ . Considering the delay time between the pulses, a simple thermal model based on a kinetic energy transfer without taking into account any heat dissipation allows us to estimate the minimum delay  $t_{\text{min}}$  to switch the VO<sub>2</sub> volume ( $V = 7 \times 10^{-16}$  m<sup>3</sup>). Considering that the joule heating on a submicrosecond time scale is followed by thermal diffusion which is responsible for the VO<sub>2</sub> transition, according to the Fourier law,

$$c_{\text{VO}_2} \rho_{\text{VO}_2} V (T_f - T_i) = UI t_{\text{min}}, \quad (3)$$

where  $c_{\text{VO}_2}$  is the VO<sub>2</sub> heat capacity (690 J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>),  $\rho_{\text{VO}_2}$  is the VO<sub>2</sub> density (4340 kg m<sup>-3</sup>),<sup>18</sup>  $T_f$  and  $T_i$  are, respec-

tively, the final and the initial temperatures of the film. For  $U = V_{\text{th}} = 10.5$  V and a current intensity which has been measured to be  $I = 8.8$  mA, Eq. (3) yields  $t_{\text{min}} = 700$  ns. Our experimental results show a commutation time of less than 100 ns, which is about one order of magnitude shorter than the result given by the simple thermal model. Taking into consideration the device geometry (two terminal device), it is difficult to conclude on the physical mechanisms responsible of the VO<sub>2</sub> switching, i.e., pure thermal effect and/or carrier injection. Nevertheless, the demonstration of such short commutation times opens the way for interesting, advanced application areas. The value of the switching time  $t_{\text{min}}$  is expected to decrease by reducing the active VO<sub>2</sub> volume in the device or by modifying the switch design.

The VO<sub>2</sub>-based devices exhibit very promising properties, in terms of microwave properties (high contrast between the on/off states, high-isolation over a broadband frequency domain) and potentially short switching times that can be compared to those of the recently developed rf-microelectromechanical system (MEMS) switches. Indeed, the observed commutation time of the VO<sub>2</sub>-based devices is less than two orders of magnitude than classical rf-MEMS switches previously reported in literature or developed in our group and shorter than state-of-the-art, fastest MEMS actuators recently developed by Lacroix *et al.*<sup>19</sup> Furthermore, these conceptually simple VO<sub>2</sub>-based switches are efficient on a frequency range of more than 35 GHz, much more wider than the widths of the working bands (10–15 GHz) generally attained when using rf-MEMS switches. VO<sub>2</sub>-based switches appear as promising candidates for realizing efficient and simple rf switches or more complex devices for telecommunication applications.

<sup>1</sup>F. Morin, Phys. Rev. Lett. **3**, 34 (1959).

<sup>2</sup>N. F. Mott, *Metal-Insulator Transitions* (Taylor and Francis, London, 1974), p. 185.

<sup>3</sup>H. Wang, X. Yi, S. Chen, and X. Fu, Sens. Actuators, A **122**, 108 (2005).

<sup>4</sup>M. Maaza, K. Bouziane, J. Maritz, D. S. McLachlan, R. Swanepool, J. M. Frigerio, and M. Every, Opt. Mater. (Amsterdam, Neth.) **15**, 41 (2005).

<sup>5</sup>L. Jiang and W. N. Carr, J. Micromech. Microeng. **14**, 833 (2004).

<sup>6</sup>L. A. L. de Almeida, G. S. Deep, A. M. N. Lima, and H. Neff, Appl. Phys. Lett. **77**, 4365 (2000).

<sup>7</sup>A. Pergament, J. Phys.: Condens. Matter **15**, 3217 (2003).

<sup>8</sup>A. Cavalleri, T. Dekorsy, H. H. W. Chong, J. C. Kieffer, and R. W. Schoenleim, Phys. Rev. B **70**, 161102 (2004).

<sup>9</sup>A. Cavalleri, C. Tóth, C. W. Siders, J. A. Squier, F. Ráksi, P. Forget, and J. C. Kieffer, Phys. Rev. Lett. **87**, 237401 (2001).

<sup>10</sup>S. Lysenko, A. J. Rua, V. Vikhnin, J. Jimenez, F. Fernandez, and H. Liu, Appl. Surf. Sci. **252**, 5512 (2006).

<sup>11</sup>M. Dragoman, A. Cismaru, H. Hartnagel, and R. Plana, Appl. Phys. Lett. **88**, 073503 (2006).

<sup>12</sup>F. Dumas-Bouchiat, H. S. Nagaraja, F. Rossignol, C. Champeaux, G. Trol-liard, A. Catherinot, and D. Givord, J. Appl. Phys. **100**, 064304 (2006).

<sup>13</sup>G. Garry, O. Durand, and A. Lordereau, Thin Solid Films **453**, 427 (2004).

<sup>14</sup>D. Youn, J. Lee, B. Chae, H. Kim, S. Maeng, and K. Kang, J. Appl. Phys. **95**, 1407 (2004).

<sup>15</sup>G. Stefanovich, A. Pergament, and D. Stefanovich, J. Phys.: Condens. Matter **12**, 8837 (2000).

<sup>16</sup>J. Lee, M. Ortolani, U. Schade, Y. Chang, and T. Noh, Appl. Phys. Lett. **90**, 051907 (2007).

<sup>17</sup>B. Chae, H. Tak, D. Youn, and K. Kang, Physica B **369**, 76 (2005).

<sup>18</sup>G. Samsonov, *The Oxide Handbook* (IFI/Plenum, New York, 1987), p. 144.

<sup>19</sup>B. Lacroix, A. Pothier, A. Crunteanu, C. Cibert, F. Dumas-Bouchiat, C. Champeaux, A. Catherinot, and P. Blondy, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **55**, 1314 (2007).

### 2.3.2. ETUDE DE LA FIABILITE DES COMMUTATEURS A BASE DE VO<sub>2</sub> [41]

**A**vant d'intégrer ces commutateurs haute-fréquence à base de VO<sub>2</sub> dans des systèmes complexes, il nous a semblé important d'étudier leur fiabilité lors de leur actionnement électrique, en appliquant une tension ou par injection d'un courant. Nous présentons donc dans ce paragraphe, une étude sur la fiabilité et la durée de vie de commutateurs électriques à deux-terminaux intégrant le dioxyde de vanadium, intégrés dans des guides d'ondes micro-ondes en technologie coplanaire en configuration série.

Les caractéristiques I-V des motifs de VO<sub>2</sub> sont déterminées en réalisant le circuit simple représenté dans l'insert de la Figure 2.24, où la source utilisée est de type source-mètre Keithley 2612A pouvant fonctionner en mode tension (V-mode) ou en mode courant (I-mode).

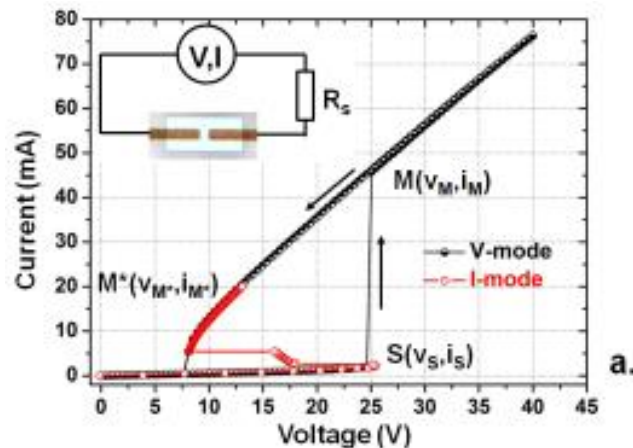


Figure 2.24. Caractéristiques I-V (en mode V et I) d'un motif de VO<sub>2</sub> de 10-µm de long.

Dans les caractéristiques I-V du composant à VO<sub>2</sub>, représentées sur la Figure 2.24, on constate, comme auparavant, la présence de sauts en courant pour le mode V et de régions à résistances différentielles négatives (ou NDR) pour le mode I, qui marquent les endroits où le VO<sub>2</sub> transite d'un état à un autre (transition MIT). On note, également, la présence d'un fort cycle d'hystérésis lors de l'activation en tension. Nous avons intégré des commutateurs VO<sub>2</sub> présentant les caractéristiques I-V montrées sur la Figure 2.24 dans des guides micro-ondes coplanaires en configuration série (insert sur la Figure 2.25). Comme indiqué dans la section précédente, le principe de commutation est illustré sur la Figure 2.25, pour une activation électrique du motif de VO<sub>2</sub> avec un signal triangulaire de 10 Hz et d'amplitude 100V. Le paramètre de transmission  $S_{21}$  du commutateur oscille périodiquement entre  $\sim -3$ dB (état ON) et en-dessous de  $-25$ dB (état OFF).

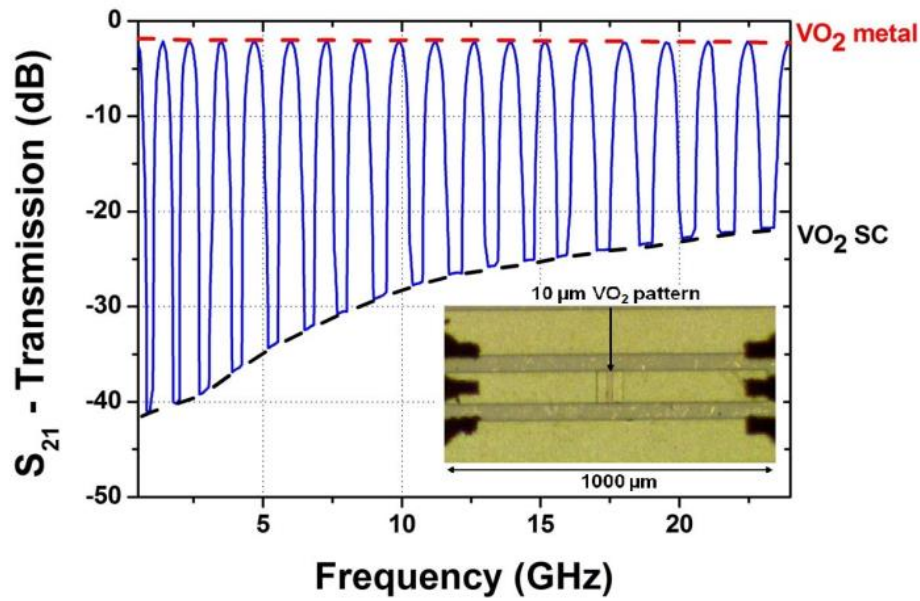


Figure 2.25. Evolution du paramètre  $S_{21}$  en fonction de la fréquence pour la commutation électrique périodique en tension (amplitude 100 V à 10 Hz) des commutateurs CPW à l'état OFF ( $\text{VO}_2$  SC) et à l'état ON ( $\text{VO}_2$  métal). L'insert montre une image par microscopie optique du commutateur testé.

Pour déterminer la durée de vie des dispositifs CPW pour les deux types d'actionnement (tension et courant), nous utilisons le banc de mesure qui est décrit sur la Figure 2.26. Il est composé d'une source micro-ondes (Agilent E3633A) opérant à 10 GHz connectée au dispositif sous test (DUT) par un circulateur. Le signal électrique de commande est appliqué au dispositif en utilisant de T's de polarisation. Le composant à  $\text{VO}_2$  est introduit dans une station de mesure Desert Microwave sous atmosphère sèche d'azote. L'actionnement du motif de  $\text{VO}_2$  intégré sur le guide coplanaire est réalisé avec un signal triangulaire en tension ou courant périodique (Figure 2.27a, courbe noire) dont l'amplitude maximale dépasse la tension de transition MIT du matériau.

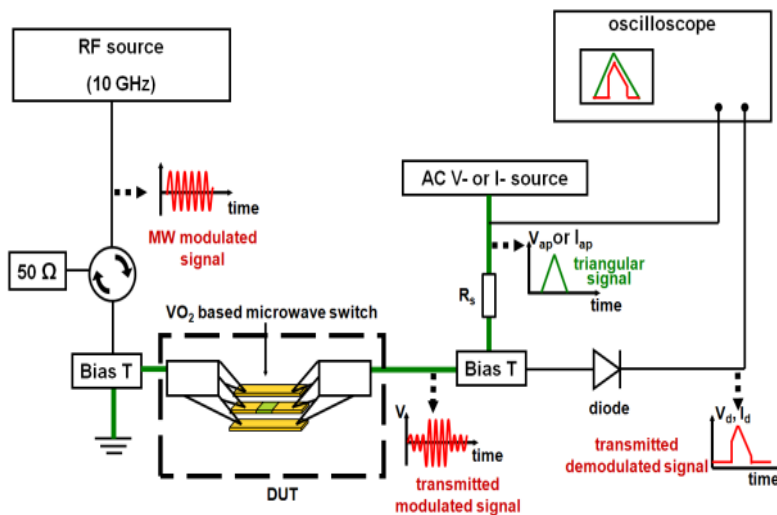


Figure 2.26. Schéma du banc de test utilisé pour déterminer la durée de vie des commutateurs à base de  $\text{VO}_2$  intégrés dans des guides d'ondes coplanaires.

Lors de l'actionnement en mode tension, la commutation du motif de  $\text{VO}_2$  a lieu au moment où la tension du signal RF (à 10 GHz) détectée devient non nulle (Figure 2.27a, courbe rouge). Dans le cas du mode I, le passage de la valeur nulle à une valeur non nulle de la tension détectée n'est pas

évident à détecter. En effet, il est masqué par le phénomène d'auto-oscillations qui apparaît lors de la transition MIT (et décrit dans la section précédente) lié à la présence d'une zone à résistance différentielle négative ou NDR que l'on retrouve sur la caractéristique I-V en mode courant du composant (Figure 2.24).

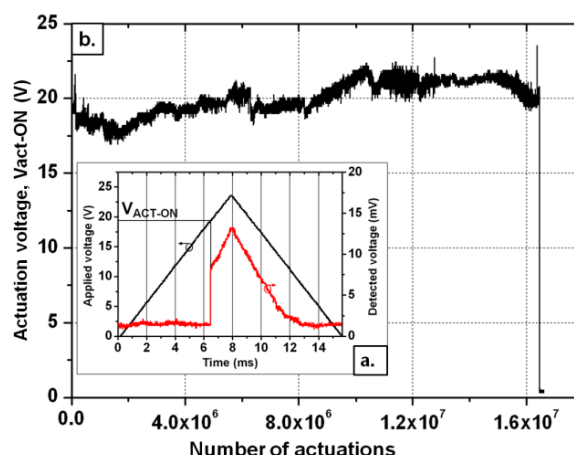


Figure 2.27. a. Cycle typique d'actionnement en tension d'un commutateur à  $VO_2$  de 10  $\mu m$  de long: Allure de la tension appliquée (courbe noire) et du signal micro-onde détecté (courbe rouge) passant à travers le composant  $VO_2$  montré dans l'insert de la Figure 2.25 et b. Évolution des valeurs de la tension d'actionnement  $V_{ACT-ON}$  avec le nombre de cycles d'actionnement.

La courbe de la Figure 2.27b représente l'évolution de la tension d'actionnement MIT ( $V_{ACT-ON}$ ) en fonction du nombre de cycles. Elle nous permet de constater que le dispositif se détruit brusquement à environ 16.25 millions de cycles lors de l'actionnement en tension alors que pour l'actionnement en courant (avec un signal de courant de forme triangulaire à 1 kHz et 10 mA d'amplitude), les 250 millions de cycles ont été dépassés sans dégradation visible. En effet dans ce dernier cas, comme le montre la Figure 2.28, après 3 jours (250 millions de cycles d'actionnement en courant), le phénomène oscillatoire est toujours présent. Ce qui nous permet d'affirmer que le  $VO_2$  transite toujours entre ses deux états. Cela se confirme, également, visuellement puisque le film ne présente aucune dégradation. On note, néanmoins, une diminution d'environ 22 mV de l'amplitude des signaux d'oscillations détectées et une augmentation de leur fréquence qui passe de 54 kHz à 84 kHz, ce qui indique une certaine « fatigue » du dispositif. Enfin, la différence de fiabilité entre les deux types d'activation, peut s'expliquer par le fort cycle d'hystérésis I-V qui est observé lors de l'activation en tension. Ce phénomène est associé aux effets thermiques induits dans le composant qui sont probablement moins importants dans le cas de l'activation en mode courant (cycle d'hystérésis très diminué voir quasi absent). Ces constations peuvent permettre de conclure que le mécanisme de transition est différent selon les modes d'activation de la transition MIT dans le  $VO_2$ .

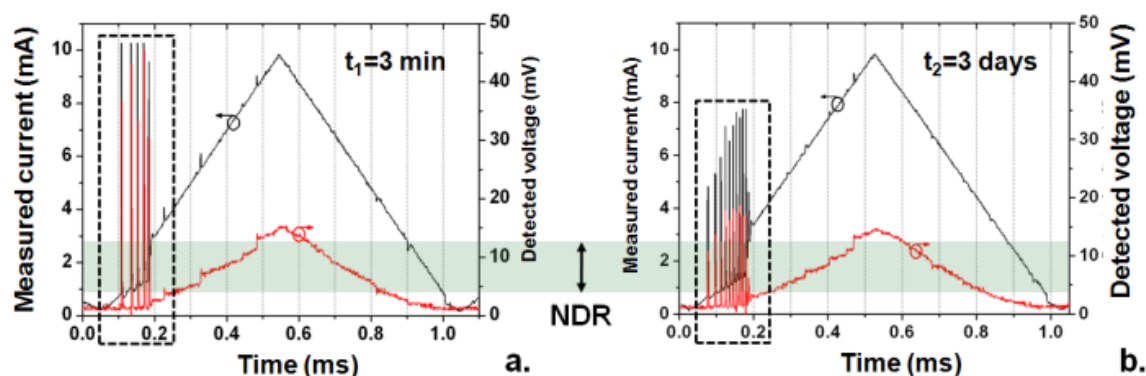


Figure 2.28. a. Signal RF détecté (courbe rouge) en fonction du temps - Allure du courant appliqué (courbe noire) pour un composant VO<sub>2</sub> de 10 µm de long après 3 minutes d'actionnement (signal en courant de 1 kHz) et b. après 250 millions de cycles d'actionnement (3 jours).

En résumé, nous avons étudié la fiabilité et la durée de vie de commutateurs CPW intégrant le matériau VO<sub>2</sub> avec une transition de phase déclenchée de façon électrique, en tension ou par injection de courant. Les résultats obtenus montrent des durées de vie des dispositifs 16 fois plus importante en mode courant (plus de 260 millions de cycles sans défaillance) qu'en tension (destruction aux alentours de 16 millions de cycles de fonctionnement).

**Plus intéressant**, comme mentionnée également dans la section 2.2.2, la variation des paramètres des phénomènes d'auto-oscillations (amplitude, fréquence) présents lors de l'activation en courant des dispositifs à VO<sub>2</sub> est un **indicateur très fin des changements induits dans le matériau** VO<sub>2</sub> lors de son analyse de durée de vie. Cette variation (sensibles à différents paramètres externes) peut être également exploitée pour **l'utilisation de ces dispositifs en tant que capteurs extrêmement précis de température, pression, ou gaz**.



# Voltage- and current-activated metal–insulator transition in VO<sub>2</sub>-based electrical switches: a lifetime operation analysis

Aurelian Crunteanu<sup>1</sup>, Julien Givernaud<sup>1</sup>, Jonathan Leroy<sup>1</sup>,  
David Mardivirin<sup>1</sup>, Corinne Champeaux<sup>2</sup>, Jean-Christophe Orlianges<sup>2</sup>,  
Alain Catherinot<sup>1</sup> and Pierre Blondy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> XLIM Research Institute UMR no. 6172, CNRS/ Université de Limoges, 123 avenue Albert Thomas, 87060 Limoges, France

<sup>2</sup> SPCTS UMR no. 6638, CNRS/ Université de Limoges, 123 avenue Albert Thomas, 87060 Limoges, France

E-mail: [aurelian.crunteanu@xlim.fr](mailto:aurelian.crunteanu@xlim.fr)

Received 20 August 2010

Accepted for publication 24 October 2010

Published 2 December 2010

Online at [stacks.iop.org/STAM/11/065002](http://stacks.iop.org/STAM/11/065002)

## Abstract

Vanadium dioxide is an intensively studied material that undergoes a temperature-induced metal–insulator phase transition accompanied by a large change in electrical resistivity. Electrical switches based on this material show promising properties in terms of speed and broadband operation. The exploration of the failure behavior and reliability of such devices is very important in view of their integration in practical electronic circuits. We performed systematic lifetime investigations of two-terminal switches based on the electrical activation of the metal–insulator transition in VO<sub>2</sub> thin films. The devices were integrated in coplanar microwave waveguides (CPWs) in series configuration. We detected the evolution of a 10 GHz microwave signal transmitted through the CPW, modulated by the activation of the VO<sub>2</sub> switches in both voltage- and current-controlled modes. We demonstrated enhanced lifetime operation of current-controlled VO<sub>2</sub>-based switching (more than 260 million cycles without failure) compared with the voltage-activated mode (breakdown at around 16 million activation cycles). The evolution of the electrical self-oscillations of a VO<sub>2</sub>-based switch induced in the current-operated mode is a subtle indicator of the material properties modification and can be used to monitor its behavior under various external stresses in sensor applications.

Keywords: vanadium dioxide, electrical switching, metal–insulator transition, lifetime operation

## 1. Introduction

Vanadium dioxide (VO<sub>2</sub>) exhibits a reversible temperature-driven metal–insulator transition (MIT), which markedly changes its electronic and optical properties [1, 2]. Below the transition temperature of ~68 °C, VO<sub>2</sub> behaves as an insulator or semiconductor with a monoclinic crystal structure and a band gap of about 1 eV, whereas for temperatures higher

than 68 °C, it transforms abruptly to a metallic state with a tetragonal rutile structure. In VO<sub>2</sub> thin films, this transition can be triggered by thermal [1–3], electrical (charge injection or Joule heating) [2–4] or optical excitation (photon excitation) [5, 6], and even by external pressure or strain [7]. The MIT induces extremely fast and abrupt changes in the electronic and optical properties of the material: the electrical resistivity increases by 3 to 5 orders

of magnitude (depending on the crystalline quality of the deposited films [8], stoichiometry and doping [9]) while the optical reflectivity markedly decreases [5, 6]. An activation time as short as 100 fs has been reported for the optically driven MIT transition [5, 6], and the electronically induced transition occurs within nanoseconds [2–4, 10]. The physical mechanisms underlying the MIT in VO<sub>2</sub> are not fully elucidated and it is still unclear whether the transition is driven by the crystalline phase transition (from monoclinic to the tetragonal phase) or by electron–electron correlations (pure electronic Mott transition), although recent reports apparently favor the second mechanism [11]. The remarkable properties and broadband operation of the MIT in VO<sub>2</sub> have received ever-increasing attention from the scientific community during the last few years and have made the material an interesting candidate for fast switching with feasible applications in domains spanning over the entire electromagnetic spectrum. These applications include low-frequency two- and three-terminal electrical switches [2–4], RF-microwave switches, tunable filters [10, 12] and power limiters [13], THz metamaterial devices [14, 15] and nanoresonators [16] and optical [5, 6] components.

For the realization of practical devices, the electrical activation of VO<sub>2</sub> (in two- or three-terminal configurations) is favored over the thermal one as it offers faster activation times and easier implementation. However, the literature on the lifetime and reliability of such components is scarce. An early study by Guzman *et al* [17] on the electrical characteristics of VO<sub>2</sub> thin films obtained by the sol–gel method showed that their MIT switching properties were unaffected after 108 Joule-heating activation cycles. On the other hand, Ilinski *et al* [18] observed a rapid degradation and suppression of the MIT hysteresis loops in the electrical conductivity and optical reflectivity of amorphous VO<sub>2</sub> thin films after only a few thermal cycles across the phase transition region. More recently, Ko and Ramanathan [19] have shown that the MIT characteristics of high-quality polycrystalline VO<sub>2</sub> thin films were largely unaffected after 102 thermal cycles over the phase transition. It was suggested [19] that during thermocycling, the polycrystalline structure of VO<sub>2</sub> thin films prevents microcrack formation and hinders oxygen diffusion from VO<sub>2</sub> clusters to the nearby low-oxygen regions, as observed in the amorphous films.

Studies on the effect of recurrent electrical activation of VO<sub>2</sub> switches on their properties have not yet been reported. Therefore, in this paper, we present a methodical investigation on the reliability and lifetime of electrical switching based on the MIT in VO<sub>2</sub> thin films.

## 2. Experimental details

We fabricated two-terminal devices using VO<sub>2</sub> thin films obtained by pulsed laser deposition (PLD), which were further integrated in coplanar microwave waveguides (CPWs) [10]. We recorded the evolution of a continuous microwave (MW) signal at 10 GHz traveling through a microwave guide during the sequential activation of a VO<sub>2</sub> device. Using this detection

method, we aimed to avoid interference and feedback between the detected signal and the actuation of the VO<sub>2</sub>-based switches.

VO<sub>2</sub> thin films were deposited using reactive PLD from a high-purity (99.95%) vanadium target under an oxygen atmosphere on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> *c*-type substrates. The experimental conditions are detailed elsewhere [10, 12]. The obtained 200-nm-thick VO<sub>2</sub> films were crystalline and showed a change in resistivity of about 5 orders of magnitude during a thermally induced MIT [12]. The two-terminal VO<sub>2</sub> switches were fabricated in a clean room environment [10, 12]: VO<sub>2</sub> rectangular patterns with different dimensions were defined lithographically, and gold electrodes were deposited and patterned on the VO<sub>2</sub> patterns. The electrode width was 20  $\mu$ m and the spacing was varied between 5 and 50  $\mu$ m. Current–voltage (*I*–*V*) characteristics of the two-terminal devices were recorded using a Keithley 2612A source meter in voltage or current mode.

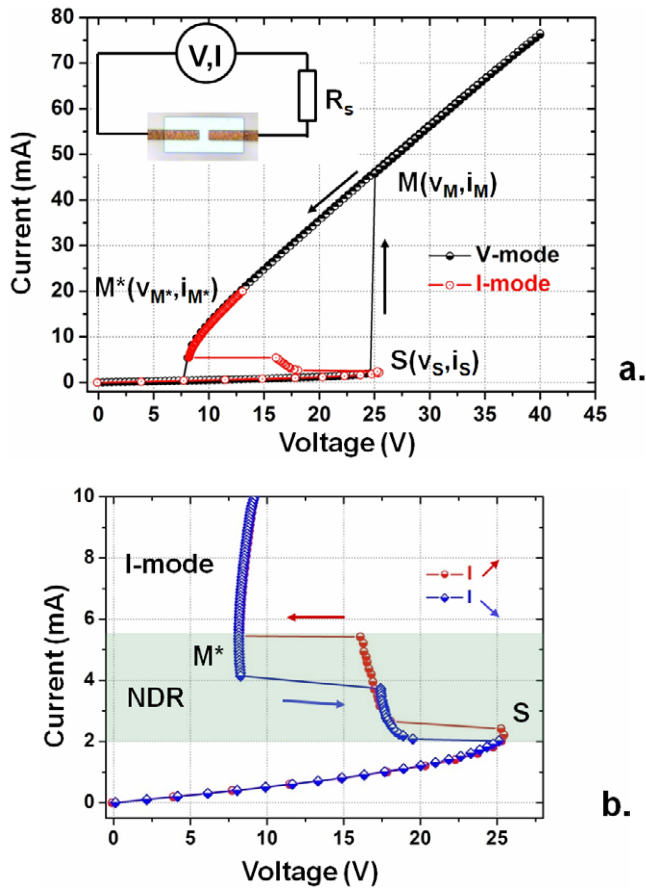
## 3. Results and discussion

### 3.1. Characterization of VO<sub>2</sub>-based two-terminal devices

Figure 1(a) shows the *I*–*V* curves (V-mode and I-mode) of a typical VO<sub>2</sub> switch of 20  $\mu$ m length and 20  $\mu$ m width. The switch was integrated in the simple measurement setup depicted in the inset of figure 1(a), in series with a 1 k $\Omega$  resistance (*R<sub>s</sub>*) and the voltage or current source. Both *I*–*V* characteristics are highly nonlinear. In the V-mode operation, when the voltage is raised to the threshold value *V<sub>s</sub>*, the VO<sub>2</sub> transforms abruptly from the highly resistive insulator state (point S on the *I*–*V* curve) to the low-resistive metallic state (point M). Consequently, the current jumps from  $\sim$ 2.2 to 46 mA. By further increasing the applied voltage beyond point M, the V-mode *I*–*V* trace follows an ohmic linear law. When decreasing the voltage, the V-mode trace shows a large hysteresis loop ( $\Delta V = 17.5$  V) until reaching point M\* where VO<sub>2</sub> transforms back to a semiconductor. The width of the hysteresis indicates an MIT transition mediated by Joule heating [3, 4, 12]. The I-mode trace is expanded in figure 1(b) with the red arrow (blue) curves corresponding to the increasing (decreasing) current between 0 and 10 mA. The clear S-type shape reveals a region of negative differential resistance (NDR) between the instability points S and M\*. It was suggested that the onset of the NDR corresponds to the MIT in a percolative manner, with the coexistence of the semiconducting and metallic domains in VO<sub>2</sub> [3, 4, 20]. Figure 1(b) reveals that the I-mode *I*–*V* curve has a narrower hysteresis (which even disappears for devices with lengths shorter than 10  $\mu$ m), indicating that, in this case, the MIT is mainly triggered by charge injection with less heat generation.

### 3.2. Coplanar microwave waveguides integrating VO<sub>2</sub> switches

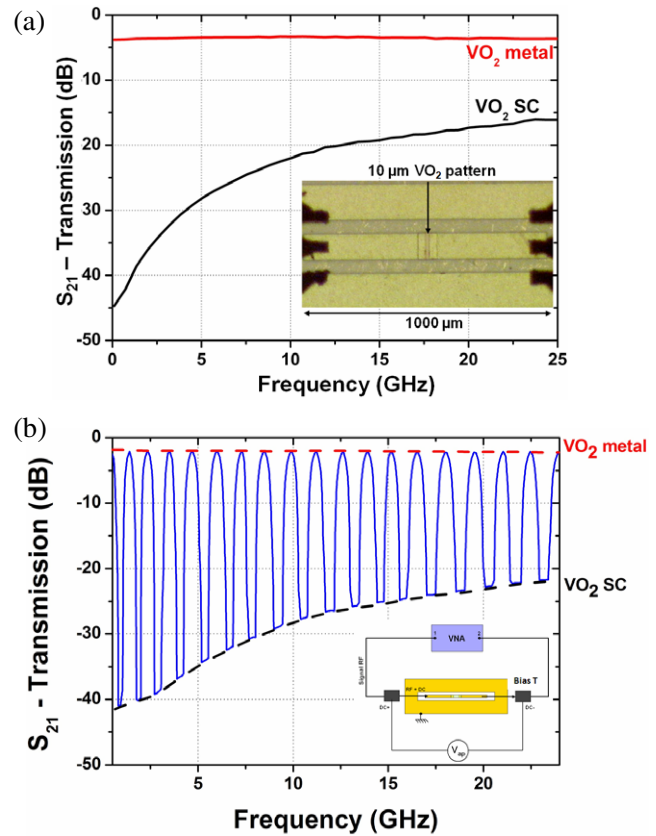
We integrated the VO<sub>2</sub> electrical switches with the *I*–*V* characteristics shown in figure 1 to coplanar microwave waveguides in a series configuration, with a central signal



**Figure 1.** (a)  $I$ - $V$  curves (V-mode and I-modes) of a two-terminal  $\text{VO}_2$  switch (20- $\mu\text{m}$  length and 20- $\mu\text{m}$  width); the inset shows the  $\text{VO}_2$  switch integrated in series with a resistance ( $R_s$ ) and the voltage or current source. (b) Enlarged view of the I-mode hysteresis indicating the boundaries of the NDR region.

line interrupted by a 10- $\mu\text{m}$ -long  $\text{VO}_2$  pattern surrounded by two ground lines and overall dimensions adapted to the 50  $\Omega$  load (inset in figure 2(a)). In-depth details of the design, fabrication and microwave performance of such devices are given elsewhere [10, 12]. The switching principle and the performance of the obtained device are presented in figure 2(a), which shows the microwave broadband transmission curves, expressed as the transmission parameter  $S_{21}$ , versus the frequency. When the  $\text{VO}_2$  is in the semiconducting state (SC), the  $\text{VO}_2$  line is highly resistive and the switch is in the off state: the microwave signal cannot travel through the device; it is attenuated by more than 15 dB between 100 MHz and 25 GHz (black curve ‘ $\text{VO}_2$  SC’ in figure 2(a)). For a threshold bias voltage of 20 V applied across the  $\text{VO}_2$  pattern,  $\text{VO}_2$  becomes metallic and the switch is in the on state: the microwave signal is transmitted through the CPW switch with insertion losses of about 3 dB between 100 MHz and 25 GHz (red curve ‘ $\text{VO}_2$  metal’ in figure 2(a)).

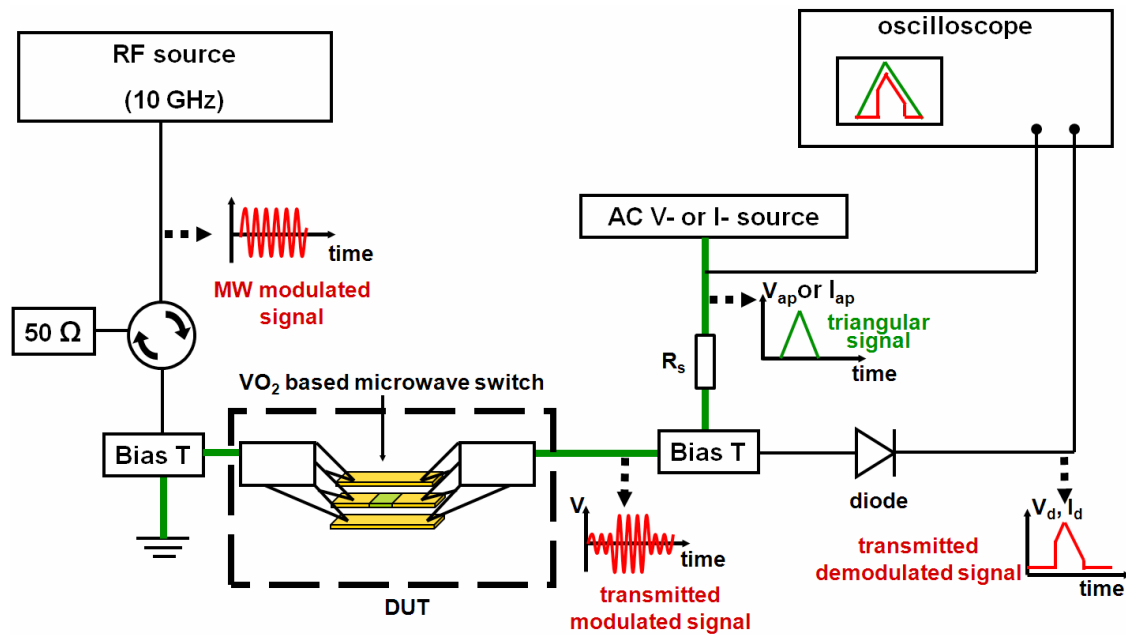
Figure 2(b) shows the dynamic behavior of a similar  $\text{VO}_2$ -based switch with a 20- $\mu\text{m}$ -long  $\text{VO}_2$  pattern, expressed as the amplitude variation of the transmitted MW signal ( $S_{21}$  parameter) when the MIT transition of the  $\text{VO}_2$  pattern is periodically triggered using an ac signal with triangular waveform, 100 V amplitude and 10 Hz frequency. In this case,



**Figure 2.** (a) Frequency dependence of the  $S_{21}$  transmission parameter for a CPW switch in the off state ( $\text{VO}_2$  SC) and in the on state ( $\text{VO}_2$  metal). The inset shows an optical microscopy image of the switch. (b) Periodic variation of the  $S_{21}$  parameter for a similar CPW switch (with a 20- $\mu\text{m}$ -long  $\text{VO}_2$  strip) cycled between the off and on states using a triangular waveform (100 V amplitude, 10 Hz frequency).

the  $S_{21}$  amplitude varies between the two extreme values that correspond to the semiconducting and metallic states of  $\text{VO}_2$  (dashed curves in figure 2(b)).

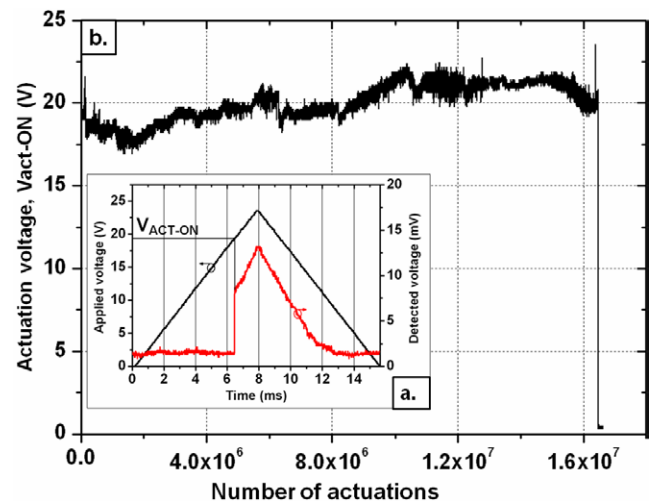
Devices having the characteristics shown in figure 2 were used for investigating the change in their properties during cycling activation of the  $\text{VO}_2$  pattern, in both V- and I-modes. They were integrated in the setup shown in figure 3. It consists of an MW source (Agilent E3633A) operating at 10 GHz—the frequency where the CPW switches have  $\sim 20$  dB difference in signal transmission between the on and off states, as observed in figures 2(a) and (b)—connected to the device under test (DUT) via a circulator and a 10 GHz band-pass filter. The  $\text{VO}_2$ -based device is introduced in a Desert Microwave probe station under dry  $\text{N}_2$  atmosphere. The MW signal traveling through the device is detected by a detector (Agilent, B474C) whose output is recorded on an oscilloscope. The MIT in  $\text{VO}_2$  is activated by applying a periodic low-frequency voltage or current signal to the two parts of the central signal line of the device, which are interrupted by the  $\text{VO}_2$  pattern (inset in figure 2(a)), using a pair of bias Ts. A 500- $\Omega$  resistance is included in the external circuit, in series with the  $\text{VO}_2$  switch. The activation signal is displayed and recorded on a second channel of the oscilloscope. A computer program automatically acquires the applied low-frequency signal and



**Figure 3.** Schematic of the setup used for assessing the lifetime of 10- $\mu\text{m}$ -long  $\text{VO}_2$  switches.

the detected MW signal transmitted through the device, allowing the recorded results to be presented in the form shown in figure 4(a) for a voltage-activated device.

**3.2.1 Voltage-controlled activation.** We first tested the performance of the device shown in the inset of figure 2(a) in the voltage activation mode. For activating the 10- $\mu\text{m}$ -long  $\text{VO}_2$  switch, we applied to the device, via the bias Ts, a triangular voltage waveform of 43 Hz frequency and 23.5 V amplitude. As indicated above, when  $\text{VO}_2$  is a semiconductor, the MW signal is considered in the off state: the 10 GHz MW signal cannot propagate and no voltage is recorded from the MW detector. For voltages above the threshold value  $V_s$  in figure 1 or  $V_{\text{ACT-ON}}$  in figure 4(a),  $\text{VO}_2$  becomes a metal, the MW signal propagates through the device, the switch is considered in the on state, and a signal is recorded from the MW detector. As shown in figure 4(a), the detected MW signal represented by the red curve allows recording the activation voltage of the device ( $V_{\text{ACT-ON}}$ ) as an indicator of the MIT transition. The second threshold voltage of the control signal,  $V_{\text{ACT-OFF}}$ , which converts  $\text{VO}_2$  back to a semiconductor and corresponds to the  $M^*$  point in figure 1(a), has not been recorded because its value was too low and comparable with the noise amplitude. Figure 4(b) shows a typical evolution of  $V_{\text{ACT-ON}}$  values versus the number of activation cycles.  $V_{\text{ACT-ON}}$  remains relatively stable for over 16.25 million activation cycles, with less than 20% variation, mainly because of the MW source instability, and then abruptly drops to zero indicating the device failure. Inspection of the device under an optical microscope revealed a clear degradation of the  $\text{VO}_2$  layer, manifested by a change in color and exfoliation, which was likely induced by heat accumulation during the cycling. Indeed, as suggested above, the large hysteresis of the V-mode trace in figure 1(a), and

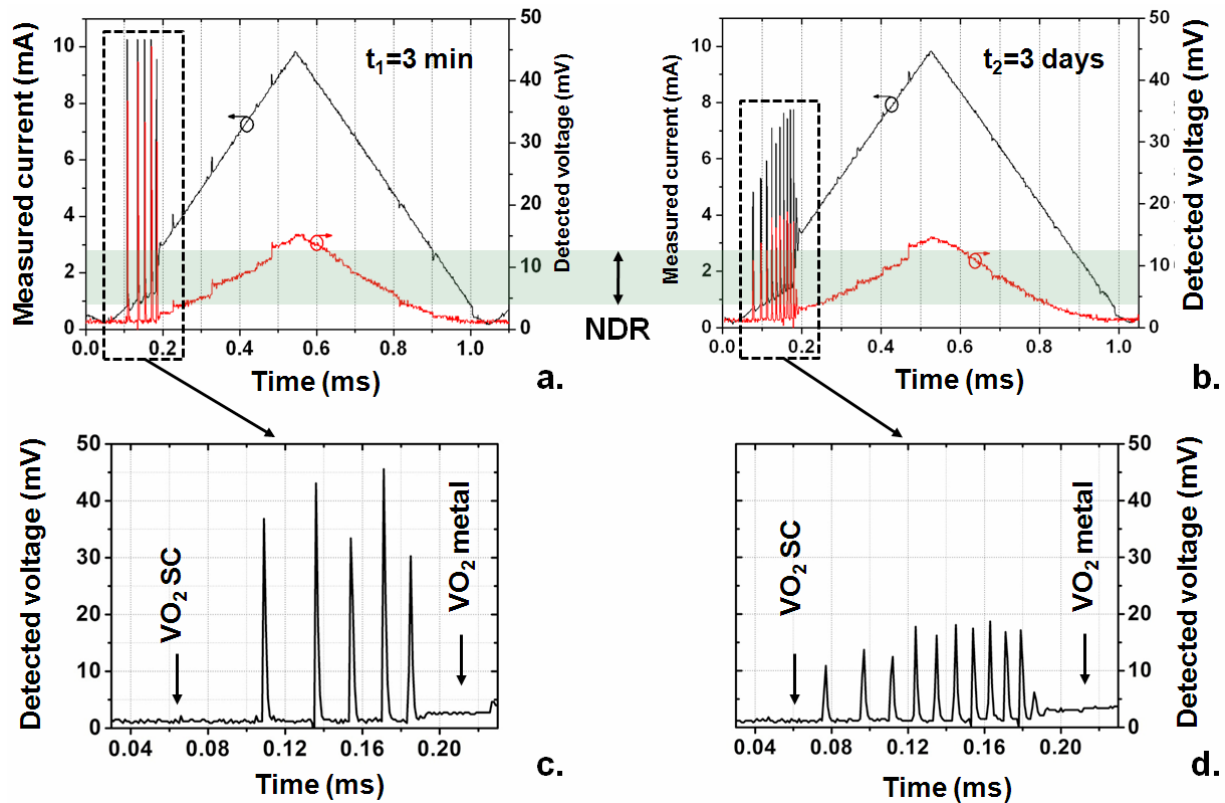


**Figure 4.** (a) Typical actuation cycle of a voltage-activated 10- $\mu\text{m}$ -long  $\text{VO}_2$  switch: the applied voltage signal (black curve) and the MW signal (red curve) detected with the setup of figure 3. (b) Evolution of  $V_{\text{ACT-ON}}$  with the number of actuation cycles.

correspondingly, the large hysteresis of the detector response in figure 4(a), suggest a thermally controlled MIT transition.

**3.2.2 Current-controlled activation.** A similar test was performed on an identical device activated in the I-mode. We used a current source (Keithley 6221) delivering a triangular waveform at 1 kHz frequency and 10 mA amplitude to the 10- $\mu\text{m}$ -long  $\text{VO}_2$  switch. The applied input current was displayed on the oscilloscope as the potential drop on a 500  $\Omega$  series resistance. Prior  $I$ - $V$  measurement in the I-mode showed that the threshold current  $I_{\text{ACT-ON}}$  ( $I_s$  in figure 1) triggering the MIT is  $\sim 1$  mA. Figures 5(a) and (b) show in a similar manner as figure 4(a) the evolution





**Figure 5.** Applied current (black curves, 1 kHz frequency) and MW voltage (red curves) detected from a 10- $\mu$ m-long VO<sub>2</sub> device, (a) after 3 min of actuation and (b) after more than 250 million actuation cycles. (c) and (d) Magnification of the dashed rectangles in (a) and (b), respectively.

of the detected MW signal (red curves) together with the applied signal ('measured current on  $R_s$ ', black curves), at the beginning of the test (after 3 min, figure 5(a)) and after more than 250 million current-actuation cycles (figure 5(b)). The device sustained more than 260 million cycles with no visible degradation, and further testing was interrupted merely for technical reasons.

The reliability tests described above were conducted on three types of CPW device, having the VO<sub>2</sub> pattern lengths between 10 and 20  $\mu$ m, in the voltage- and current-controlled regimes. Overall, the lifetime was at least 16 times longer when the VO<sub>2</sub> devices were activated in the current mode than in the voltage mode. As shown in figures 1(a) and (b), the  $I$ - $V$  hysteresis is far more pronounced for the V-mode activation; the hysteresis width in this case is defined by the Joule heating when VO<sub>2</sub> is in the metallic state (current values above 45 mA). The hysteresis was narrower for the I-mode activation because of less pronounced resistive heating, as VO<sub>2</sub> becomes metallic at currents above 5 mA. In this case, VO<sub>2</sub> experiences lower thermal stress and lower electric fields, which should reduce the risk of dielectric breakdown, explaining the lifetime enhancement of the current-activated devices.

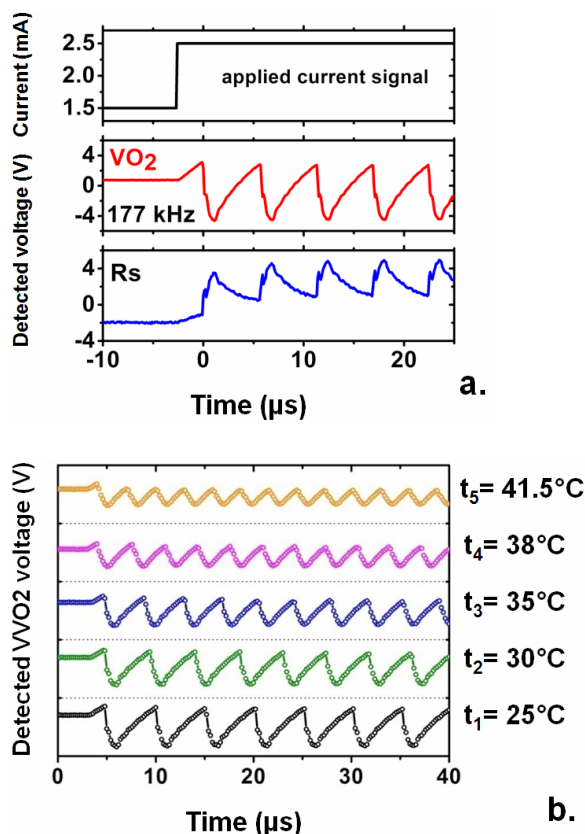
An interesting feature visible in figures 5(a) and (b) is current-induced self-oscillations in VO<sub>2</sub>. These oscillations are marked by dashed rectangles in figures 5(a) and (b) and are magnified in figures 5(c) and (d), respectively; they are related to the NDR region in the  $I$ - $V$  curves between

1 and 2.8 mA. Their occurrence depends on several external parameters, such as the amplitude of the activation signal and the value of the series resistance, and was previously observed only for voltage-controlled VO<sub>2</sub> switches [4, 21]. Their onset was explained in terms of the percolative MIT in VO<sub>2</sub>, namely, the coexistence of insulator-metallic domains seen as periodic construction-destruction of capacitive phases in the material [4, 20].

The evolution of the detected amplitude and frequency of these self-oscillations during the reliability test is the only sign of fatigue of the tested device. Indeed, as observed in figures 5(c) and (d), the amplitude of self-oscillations decreases from about 42 mV at the beginning of the test to about 17 mV after 250 million current-actuation cycles, while their average frequency increases from  $\sim 54$  to  $\sim 84$  kHz. These variations can be explained by the resistivity change of VO<sub>2</sub> or by heat accumulation in the device owing to successive current injection. Indeed, this phenomenon was observed in experiments where we induced self-oscillations in a two-terminal VO<sub>2</sub> switch of 5- $\mu$ m length and 20- $\mu$ m width by applying a square-shaped current signal (100 Hz, 2 mA amplitude) within the NDR region of the device. The applied current signals as well as the oscillations induced in the VO<sub>2</sub> switch, represented as voltage detected across the series resistance, are plotted in figure 6(a).

The amplitude and frequency of these oscillations depend, among other parameters, on the temperature of the VO<sub>2</sub> switch, as shown in figure 6(b) for the 5- $\mu$ m-long





**Figure 6.** (a) Typical self-oscillations induced by a square-shaped current waveform (100 Hz, 2 mA amplitude) in a 5- $\mu\text{m}$ -long, 20- $\mu\text{m}$ -wide two-terminal VO<sub>2</sub> switch; panel (b) shows the oscillations with temperature from  $t_1 = 25^\circ\text{C}$  to  $t_5 = 41.5^\circ\text{C}$ .

VO<sub>2</sub> switch for temperatures ranging from  $t_1 = 25^\circ\text{C}$  to  $t_5 = 41.5^\circ\text{C}$ . The amplitude of the oscillations decreases by 60% (from 6.6 to 2.6 V) with increasing temperature from  $t_1$  to  $t_5$ , whereas their frequency increases by 40% (from  $\sim 0.2$  to  $\sim 0.3$  MHz). The variation of the parameters of the self-oscillations appearing during the current-activation of VO<sub>2</sub> switches is thus a very fine indicator of the changes induced in the VO<sub>2</sub> material. This property can be further exploited for the use of these devices as temperature, pressure or gas sensors.

#### 4. Conclusions

We investigated the reliability and lifetime of the MIT in two-terminal VO<sub>2</sub> switches under multiple cycles of voltage- and current-induced activation. The lifetime was at least 16 times longer for the current-driven than the voltage-driven VO<sub>2</sub> devices; current-induced activation is less affected by thermal effects, resulting in a smaller degradation of the VO<sub>2</sub> films. This activation scheme is accompanied by electrical self-oscillations induced in the VO<sub>2</sub>-based switch, which are

a fine indicator of the modification of material properties. The presented results demonstrate the potential for the integration of VO<sub>2</sub> thin films in devices for advanced applications requiring a large number of stable and reproducible switching cycles.

#### Acknowledgment

This work was supported by ANR-France through the project ‘Admos-VO<sub>2</sub>’, ANR 07-JCJC-0047JC.

#### References

- [1] Morin F 1959 *Phys. Rev. Lett.* **3** 34
- [2] Stefanovich G, Pergament A and Stefanovich D 2000 *J. Phys.: Condens. Matter* **12** 8837
- [3] Kim H T, Chae B G, Youn D H, Maeng S L, Kim G, Kang K Y and Lim Y S 2004 *New J. Phys.* **6** 52
- [4] Kim H-T, Kim B-J, Choi S, Chae B-G, Lee Y W, Driscoll T, Qazilbash M M and Basov D N 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 023702
- [5] Cavalleri A, Tóth C S, Siders C W, Squier J A, Ráksi F, Forget P and Kieffer J C 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 237401
- [6] Rini M, Cavalleri A, Schoenlein R W, López R, Feldman L C, Haglund R F Jr, Boatner L A and Haynes T E 2005 *Optics Lett.* **30** 558
- [7] Kikuzuki T and Lippmaa M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 132107
- [8] Sahana M B, Subbanna G N and Shivashankar S A 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 6495
- [9] Kim C, Shin J S and Ozaki H 2007 *J. Phys.: Condens. Matter* **19** 096007
- [10] Dumas-Bouchiat F, Champeaux C, Catherinot A, Crunteanu A and Blondy P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 223505
- [11] Pergament A L, Boriskov P P, Velichko A A and Kuldin N A 2010 *J. Phys. Chem. Solids* **71** 874
- [12] Dumas-Bouchiat F, Champeaux C, Catherinot A, Givernaud J, Crunteanu A and Blondy P 2009 *Materials and Devices for Smart Systems III* ed J Su, L-P Wang, Y Furuya, S Troler-McKinstry and J Leng (*Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*) **1129** 275
- [13] Givernaud J, Crunteanu A, Orlianges J-C, Pothier A, Champeaux C, Catherinot A and Blondy P 2010 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* doi 10.1109/TMTT.2010.2057172
- [14] Driscoll T, Kim H-T, Chae B-G, Kim B-J, Lee Y-W, Marie Jokerst, Palit S, Smith D R, Di Ventra M and Basov D N 2009 *Science* **325** 1518
- [15] Wen Q-Y, Zhang H-W, Yang Q-H, Xie Y-S, Chen K and Liu Y-L 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 021111
- [16] Kim D 2009 *34th Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz* art. no. 5324735
- [17] Guzman G, Beteille F, Morineau R and Livage J 1996 *J. Mater. Chem.* **6** 505
- [18] Ilinski A, Silva-Andrade F, Shadrin E and Klimov V 2004 *J. Non-Cryst. Solids* **338–340** 266
- [19] Ko C and Ramanathan S 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 086105
- [20] Rozen J, Lopez R, Haglund R F and Feldman L C 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 081902
- [21] Sakai J 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 103708

## 2.4. REALISATION DE FILTRES A REJECTION DE BANDE ET A FREQUENCES ACCORDABLES BASES SUR LA TRANSITION MIT DU VO<sub>2</sub> [19, 48, 49]

Pour montrer le potentiel des matériaux à changement de phase en tant qu'éléments accordables dans le domaine des micro-ondes, nous avons réalisé également des dispositifs plus complexes, à savoir des filtres reconfigurables basés sur la transition MIT du VO<sub>2</sub>. Plus précisément, nous avons conçu des filtres à rejection de bande et des filtres passe bande agile en fréquence.

### 2.4.1 FILTRES HYPERFREQUENCES INTEGRANT DES RESONATEURS EN FORME DE C

Les filtres que nous avons développés dans un premier temps, ont été réalisés en technologie micro ruban suivant une topologie déjà développée au laboratoire [50, T1]. L'originalité de ce filtre réside dans le fait que l'accordabilité discrète est réalisée en intégrant des matériaux films minces de VO<sub>2</sub> à propriétés variables. Concrètement, il est composé d'une ligne de transmission d'impédance 50 Ω, couplée à des résonateurs en forme de C « fermés » par des motifs de VO<sub>2</sub>. Nous avons réalisé des filtres deux et quatre pôles fonctionnant autour de 11 GHz. Le principe de fonctionnement du filtre réjecteur accordable à base de VO<sub>2</sub> est illustré sur la Figure 2.29. Dans le cas d'un seul résonateur métallique, lorsque le motif de VO<sub>2</sub> est dans son état isolant ou semi-conducteur, le résonateur absorbe l'énergie EM transmise dans la ligne à une fréquence  $f_0$ . Quand le motif de VO<sub>2</sub> devient métallique, il court-circuite le résonateur et le résonateur n'absorbe plus l'énergie EM dans le domaine de fréquence d'intérêt Figure 2.30. L'addition de plusieurs résonateurs ayant des fréquences de résonance proches permet d'augmenter l'amplitude de la rejection et d'élargir la bande de fréquences coupées.

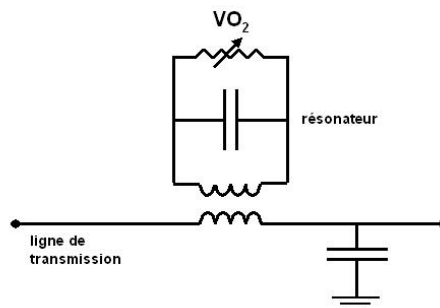


Figure 2.29. Schéma équivalent d'un résonateur intégrant un motif de VO<sub>2</sub>

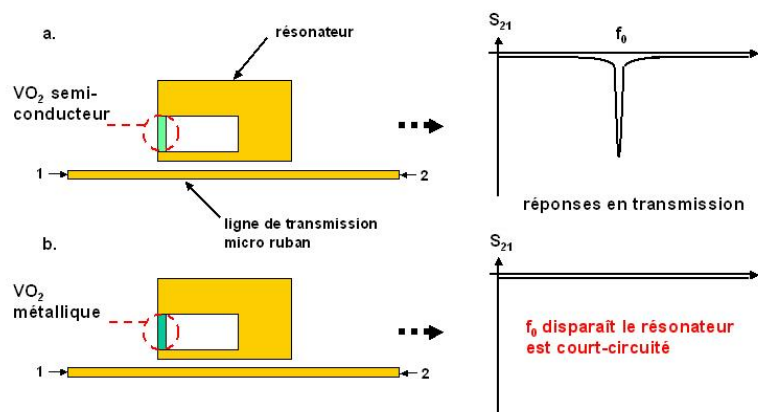


Figure 2.30. Principe de fonctionnement d'un résonateur intégrant un motif de VO<sub>2</sub> à l'état semi-conducteur a. et à l'état métallique b.

La conception électromagnétique des filtres a été effectuée à l'aide du logiciel ADS (Momentum). Les dimensions sont optimisées pour répondre à un cahier des charges imposant une fréquence de fonctionnement autour de 11 GHz, une isolation dans la bande de fréquence coupée supérieure à 20 dB et des pertes d'insertion du composant inférieures à 1 dB. Pour la réalisation du dispositif nous disposons de plusieurs films de VO<sub>2</sub> sur substrat de saphir ayant des valeurs de conductivité électrique comprises entre 100 et 200 S.m<sup>-1</sup> à l'état semi-conducteur, et comprises entre 350 000 et 400 000 S.m<sup>-1</sup> à l'état métallique.

Dans une première étape nous avons réalisé des filtres à deux et quatre pôles accordables thermiquement (la transition MIT du VO<sub>2</sub> est commandée en température à l'aide d'un élément chauffant Peltier lors des mesures sous pointes RF) car ce type d'actionnement est le plus simple à mettre en œuvre [48]. Cependant, l'actionnement électrique des motifs de VO<sub>2</sub> intégrés aux résonateurs permettra de commander indépendamment chaque résonateur, et d'avoir ainsi une discrétisation de la réponse du filtre. Pour ceci, nous avons conçu et réalisé un filtre stop- bande quatre pôles accordables électriquement en ajoutant aux motifs de VO<sub>2</sub> des électrodes permettant leur activation indépendante. Des procédés de micro fabrication classiques ont alors été utilisés. Les mesures de paramètres S ont été effectuées à l'aide d'un analyseur vectoriel de réseau (modèle HP 8722 ES) après avoir inséré le filtre dans un boîtier de test intégrant des connecteurs SMA et un système de fils électriques pour appliquer la tension (Figure 2.31).

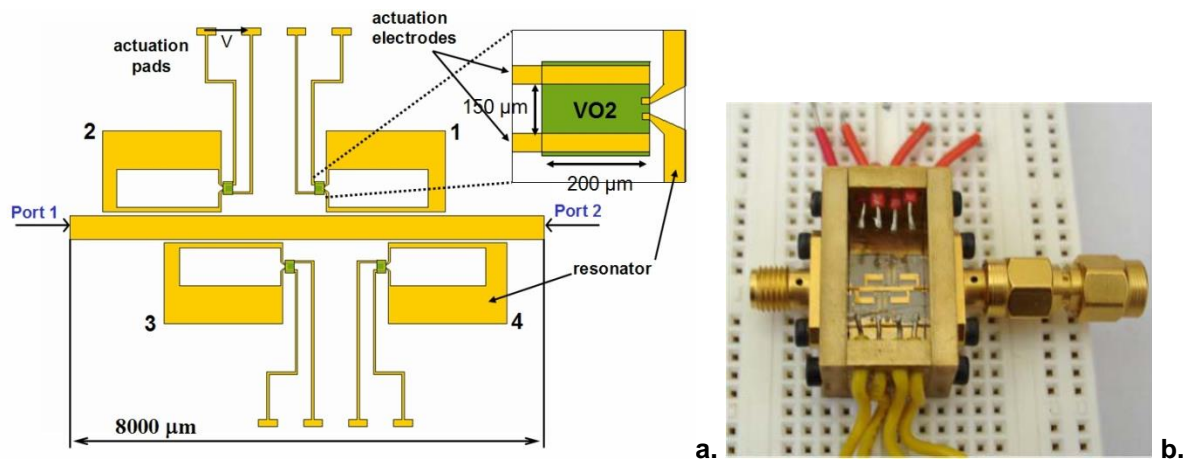


Figure 2.31. a. Topologie du filtre stop- bande quatre- pôles accordable à base de commutateurs VO<sub>2</sub> et b. Maquette expérimentale du filtre dans le boîtier de test.

Chaque résonateur est « fermé » par un motif de VO<sub>2</sub> dont la géométrie est adaptée pour pouvoir intégrer des électrodes d'actionnement (Figure 2.31a). Ces électrodes sont connectées à une alimentation par l'intermédiaire de lignes de polarisation et de plots en or. En appliquant une tension V suffisamment élevée entre les deux électrodes, on peut initier la transition MIT du motif de VO<sub>2</sub>. Ainsi chaque résonateur pourra donc être court-circuité ou non, en fonction de la tension appliquée. Il faut noter que l'intégration des électrodes dans le design du filtre est complexe car lorsque le motif de VO<sub>2</sub> est à l'état métallique, il faut éviter au maximum la propagation du signal micro-onde dans les électrodes (fuites dans le circuit électrique d'actionnement), au risque d'avoir des résonances parasites.

Les résultats de simulations électromagnétiques du filtre et certaines mesures représentatives réalisées sont recensés sur la Figure 2.32.

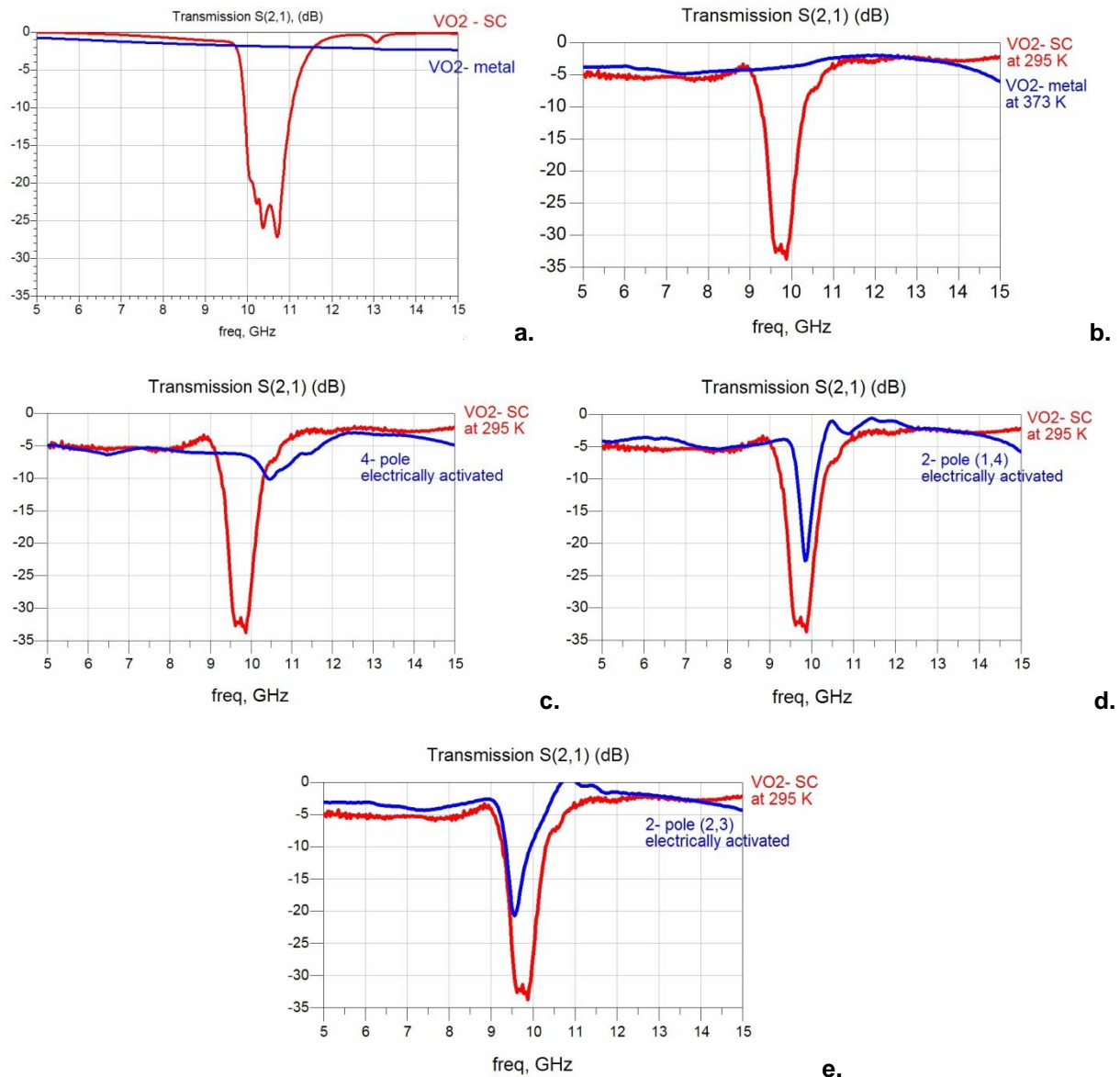


Figure 2.32. a. Simulation de la transmission du filtre quatre pôles, actionnable électriquement, lorsque tous les motifs de VO<sub>2</sub> sont à l'état isolant (courbe rouge) et à l'état métallique (courbe bleu). b. Mesures en transmission du filtre quatre pôles réalisé, lorsque tous les motifs de VO<sub>2</sub> sont à l'état isolant (courbe rouge) et à l'état métallique (courbe bleu, motifs actionnés thermiquement). c. d. et e. Réponses en transmission du filtre réalisé (courbes bleu) lorsque toutes les motifs de VO<sub>2</sub> sont actionnés électriquement (c), quand seulement les motifs des résonateurs 1 et 4 sont actionnés électriquement (d) et quand seulement les motifs des résonateurs 2 et 3 sont actionnés électriquement.

Lorsque tous les motifs de VO<sub>2</sub> sont à l'état semi-conducteur, la mesure en transmission ( $S_{21}$ ) du filtre fabriqué fait apparaître seulement deux pics de résonance avec une amplitude de réjection supérieure à 20 dB (les fréquences propres des quatre résonateurs sont très proches l'une de l'autre). La mesure en chauffant le boîtier à 100°C et donc en réalisant un actionnement en température de l'ensemble des motifs de VO<sub>2</sub> intégrés aux résonateurs (Figure 2.32b, courbe bleu) montre que les pertes, lors de l'actionnement thermique sont raisonnablement faibles (< 5 dB). Cependant, lorsque tous les motifs de VO<sub>2</sub> sont actionnés à l'état métallique électriquement (en appliquant une tension à chaque électrode d'actionnement, Figure 2.32c courbe bleu) les pertes en transmission sont très importantes, de l'ordre de 10 dB à 10.6 GHz. Ceci indique le fait que les motifs de VO<sub>2</sub> ne sont pas correctement activés à l'état métallique : il faut donc revoir le design de l'actionnement électrique qui

induit des pertes dans la transmission du signal. En effet, une observation par microscopie optique réalisée pendant l'actionnement électrique d'un des motifs de  $\text{VO}_2$  du filtre, confirme le fait que celui-ci ne devient pas complètement métallique. Deux autres combinaisons de filtrage possibles mesurées sont représentées sur la Figure 2.32 d et e, lors de l'actionnement électrique des motifs de  $\text{VO}_2$  correspondant à seulement deux pôles du filtre (1-4 et 2-3 respectivement).

Globalement, les pertes d'insertion des filtres réalisés sont relativement élevées ( $\sim 1.2$  dB pour un filtre deux pôles et environ 2.5 dB pour un filtre quatre pôles), mais elles peuvent être significativement diminuées en utilisant des films de  $\text{VO}_2$  présentant des conductivités plus faibles à l'état métallique, et en optimisant le système de polarisation. Les mesures réalisées sur le filtre quatre pôles actionnable par chauffage par effet Joule, concorde très bien avec les simulations. Cependant, la topologie choisie n'est pas complètement adaptée pour concevoir un bon filtre accordable électriquement.

Pour pallier ce problème, nous nous sommes orientés vers de nouvelles topologies de résonateurs à savoir de type SRR (Split Ring Resonator). En effet, ces résonateurs permettent d'intégrer plus facilement un actionnement électrique des motifs de  $\text{VO}_2$ .

#### 2.4.2 FILTRES HYPERFREQUENCES EN TECHNOLOGIE SRR (SPLIT-RING RESONATORS) [51]

La conception de ces dispositifs a été réalisée **dans le cadre d'une collaboration avec le Prof. Ferran Martin (CIMITEC –Espagne) lors du stage post- doctoral de David Bouyge.**

Nous avons donc conçu et réalisé des filtres accordables passe-bande fonctionnant en bande X qui combinent, pour la première fois, des résonateurs métamatériaux type SRR permettant de miniaturiser le dispositif et des commutateurs à base de films de dioxyde de vanadium pour obtenir une accordabilité discrète [51]. Le filtre passe-bande (Figure 2.33) est donc composé de paires de résonateurs SRR couplés (deux C repliés l'un sur l'autre), chargés judicieusement avec des motifs de  $\text{VO}_2$ . Dans cette configuration, le couplage électrique entre les deux résonateurs détermine le comportement passe-bande du filtre tandis que l'alimentation des résonateurs par les lignes de transmission assure l'apparition des zéros de transmission des deux côtés de la bande passante, permettant une meilleure sélectivité en fréquence. L'actionnement électrique des motifs de  $\text{VO}_2$  s'effectue à l'aide d'une ligne de polarisation connectée l'une des électrodes par l'intermédiaire d'une ligne résistive. La deuxième électrode réalisée grâce à la métallisation du résonateur est reliée à la masse.

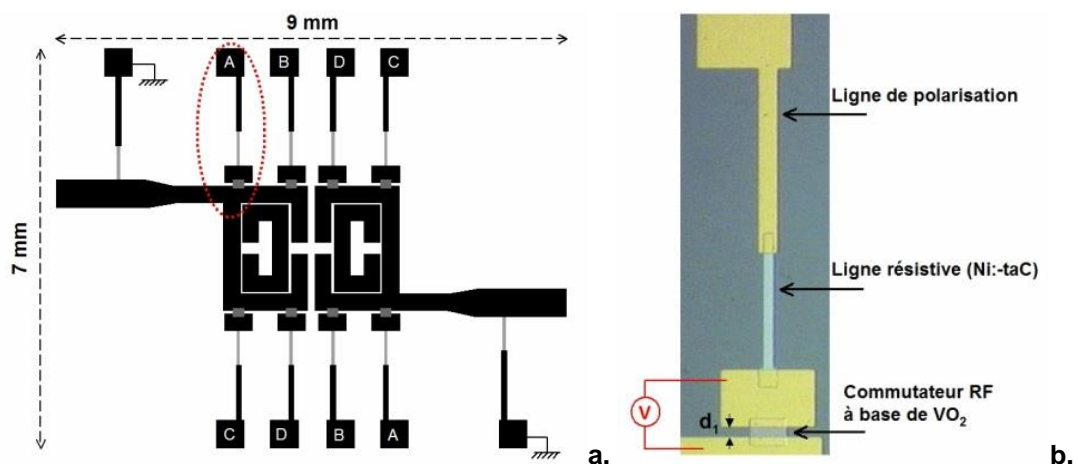


Figure 2.33. a. Topologie du filtre accordable passe-bande SRR et b. Polarisation du commutateur à  $\text{VO}_2$ . Les dimensions des motifs métalliques et des motifs  $\text{VO}_2$  sont respectivement de  $500 \times 300 \mu\text{m}^2$  et  $200 \times 150 \mu\text{m}^2$ . Les largeurs et la distance entre les anneaux des SRR sont de  $300 \mu\text{m}$  et de  $30 \mu\text{m}$ . La distance entre chaque anneau externe et le motif métallique est  $d_1 = 50 \mu\text{m}$ .



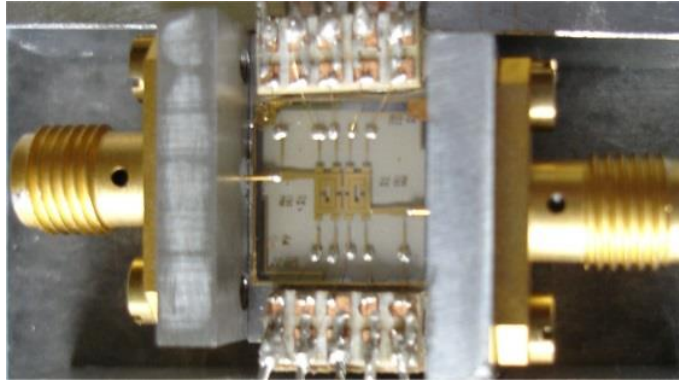


Figure 2.34. Photographie du filtre accordable SRR passe bande à base de  $\text{VO}_2$  placé dans un boîtier métallique pour les mesures haute fréquences.

Les résultats expérimentaux du filtre ainsi réalisé au laboratoire (Figure 2.34) montrent un bon accord avec les simulations à l'exception du niveau des pertes insertion légèrement supérieur. Comme anticipé, la réponse en fréquence du filtre montre deux zéros de transmission et une préservation de la fonction de filtrage du circuit avec une accordabilité proche de 10% (les détails exacts concernant les résultats obtenus sont indiqués dans la référence [51] et le papier associé à cette partie).

Un autre exemple d'implémentation de ce type de résonateur SRR pour réaliser un filtre stop bande est présenté sur la Figure 2.35, avec les résultats de simulations et expérimentaux [52].

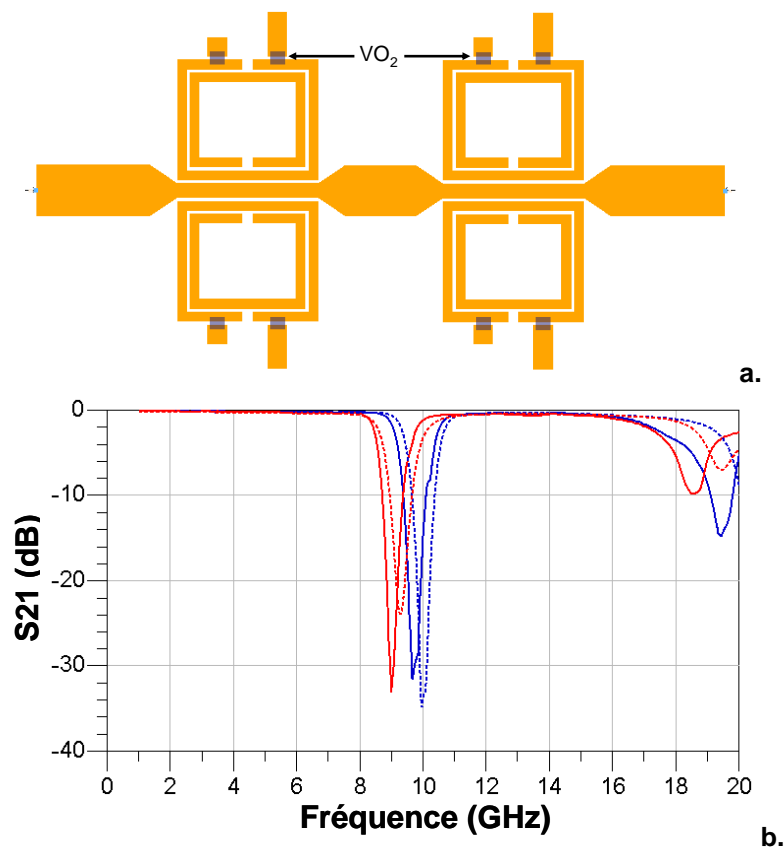


Figure 2.35. a. Design d'un filtre SRR stop-bande accordable (2 bit) et b. Réponses en transmission  $S_{21}$  du filtre en simulation (traits en pointillés) et en mesure (traits pleins) quand toutes les motifs de  $\text{VO}_2$  sont à l'état semi-conducteur (courbes bleus) et à l'état métallique (courbes rouges).

Les réponses ainsi obtenues montrent un bon accord: un niveau de pertes très faible et une très bonne accordabilité, à l'exception d'un léger décalage fréquentiel des réponses expérimentales par rapport aux simulations.

En conclusion de cette partie, nous avons validé la possibilité d'utiliser des couches minces de  $\text{VO}_2$  comme éléments accordables dans des filtres micro-ondes. Même si les réponses obtenues expérimentalement ne présentent pas des caractéristiques remarquables en comparaison avec l'état de l'art, nous avons proposé une approche innovante permettant de réaliser des circuits reconfigurables dans le domaine micro-onde. Une meilleure maîtrise des propriétés du matériau et de la conception de ces dispositifs (notamment au niveau de l'implémentation des électrodes d'actionnement électrique) permettrait d'accroître encore les performances de ces composants.

## RF Microwave Switches Based on Reversible Metal-Semiconductor Transition Properties of VO<sub>2</sub> Thin Films: An Attractive Way to Realise Simple RF Microelectronic Devices.

Frédéric Dumas-Bouchiat<sup>1,2,3</sup>, Corinne Champeaux<sup>1</sup>, Alain Catherinot<sup>1</sup>,  
Julien Givernaud<sup>2</sup>, Aurelian Crunteanu<sup>2</sup> and Pierre Blondy<sup>2</sup>,  
<sup>1</sup>SPCTS UMR 6638, Université de Limoges / CNRS, France,  
<sup>2</sup>Xlim UMR 6172, Université de Limoges / CNRS, France,  
<sup>3</sup>Institut Néel UPR 2940, Université de Grenoble I / CNRS, France.

### ABSTRACT

Microwave switches in both shunt and series configurations have been developed using the semiconductor to metal (SC-M) transition of vanadium dioxide (VO<sub>2</sub>) thin films deposited by *in situ* pulsed laser deposition on C-plane sapphire and SiO<sub>2</sub>/Si substrates. The influence of geometrical parameters such as the length of the switch is shown. The VO<sub>2</sub>-based switches exhibit up to 30-40 dB average isolation of the radio-frequency (RF) signal over a very wide frequency band (500 MHz-35 GHz) with weak insertion losses, when thermally activated. Furthermore, they can be electrically activated. Finally, these VO<sub>2</sub>-based switches are integrated in the fabrication of innovative tunable band-stop filters which consist of a transmission line coupled with four U-shaped resonators and operate in the 9-11 GHz frequency range. Its tunability is demonstrated using electrical activation of each VO<sub>2</sub>-based switch.

### INTRODUCTION

The development of advanced communication systems for defense or space applications (antennas, multi-standard communication systems etc.) requires reconfigurable RF-microwave and millimeter-wave circuits. In order to address these demands with high performance devices, the integration of active electronic components such as semiconductor-based diodes or transistors or RF MEMS-based solutions [1,2] is investigated. The performance of such devices is often limited, for example, by the high consumption of the semiconductor components or by the weak reliability of the MEMS switches. These devices demand not only an improvement of the properties of conventional electronic materials, but also the introduction of new materials with new functionalities.

One potential candidate is a thermochromic vanadium dioxide [3] that undergoes an abrupt reversible semi-conductor to metal (SC-M) transition around 341K. At this temperature the crystalline structure changes from the low-temperature monoclinic to the high-temperature tetragonal phase. During the transition, the resistivity [4] of the material and especially its optical transmission in the near-infrared domain [5] decrease abruptly. The VO<sub>2</sub> SC-M transition can also be induced in an electrical [6,7] or optical [8,9] way. In these cases, the material response time is very fast and can achieve values as low as 1 ps. Because of its controllable properties, VO<sub>2</sub> is an interesting material for applications in a wide variety of devices such as microbolometers, light modulators and optical or electrical switches [10-12]

In this paper we describe the properties of vanadium dioxide thin films deposited by *in situ* pulsed laser deposition and their integration in RF shunt and series switches and in a more

complex component, a four pole band-stop filter operating in the range 11-13 GHz which can be thermally or electrically activated.

## EXPERIMENTAL SET UP – STRUCTURAL AND OPTICAL CHARACTERIZATION

Vanadium dioxide thin films are deposited by reactive pulsed laser deposition [13,14] using a KrF laser (wavelength 248nm, pulse duration 25ns, repetition rate 10Hz) focused on a high purity grade (99.95%) vanadium metal target. The ablation takes place in an ultrahigh vacuum deposition chamber under an oxygen atmosphere. According to the numerous phases [15] in the vanadium oxide phase diagram, from  $V_4O$  to  $V_2O_5$ , the deposition of pure  $VO_2$  is obtained with a fluence, i.e. energy per irradiated unit surface area, of  $3 \text{ J/cm}^2$ , oxygen pressure of  $2.2 \times 10^{-2}$  mbar and substrate temperature of  $500^\circ\text{C}$  and without any post-treatment on C-plane sapphire and  $\text{SiO}_2(1\mu\text{m})/\text{Si}$  substrates.

The film morphology consists of compact quasispherical crystallites with a root mean square roughness of about 10 nm on the two substrates as shown by the atomic force microscopy (AFM) image in figure 1. The apparent non-dependence of the substrate nature suggests that the growth mechanism of the film seems to be imposed mainly by the laser/target interaction.

X-Ray Diffraction ( $\theta$ ,  $2\theta$ ) patterns of  $VO_2/\text{Al}_2\text{O}_3(\text{C})$  are characterised by two peaks near  $40.2^\circ$  and  $86.8^\circ$ , corresponding respectively to the (020) and (040) peaks of the monoclinic  $VO_2$  phase (fig. 2). On  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  substrates, the larger lattice mismatch between substrate and film leads to the growth of (011) planes of an orthorhombic  $VO_2$  structure such as already observed [16].

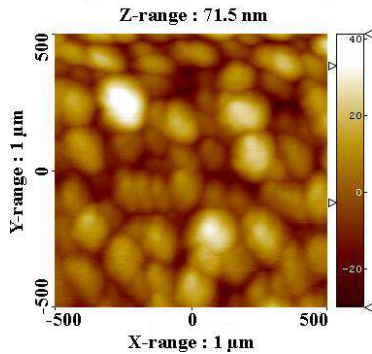


Figure 1: Typical AFM image obtained on  $VO_2$  films (thickness 75 nm) deposited onto silicon or sapphire substrates.

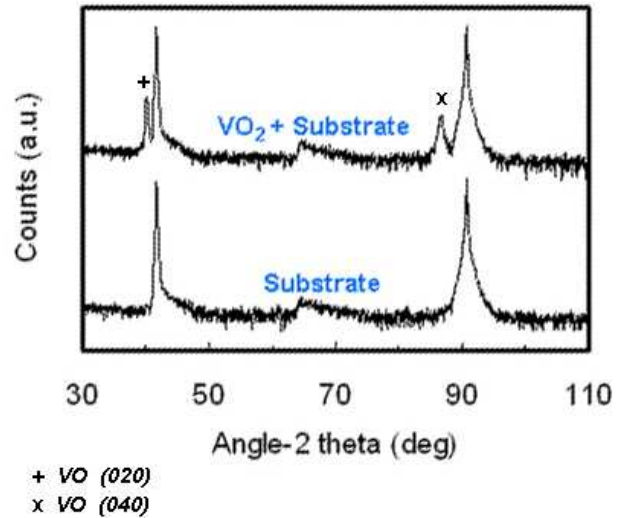


Figure 2: ( $\theta$ ,  $2\theta$ ) X-ray scan for a 100 nm  $VO_2$  thin film deposited on C-plane sapphire substrate.

Optical transmission spectra are measured as a function of the activation temperature using a Varian Carry 5000 UV Visible NIR spectrophotometer equipped with a sample heater. The transmittance decreases by a factor of about 4 during the transition from the semiconducting to the metallic phase. These curves present a particular point where the transmittance is the same

for all the temperatures. This isosbestic point is situated at a wavelength of 850 nm, confirmed by other authors and investigations [17].

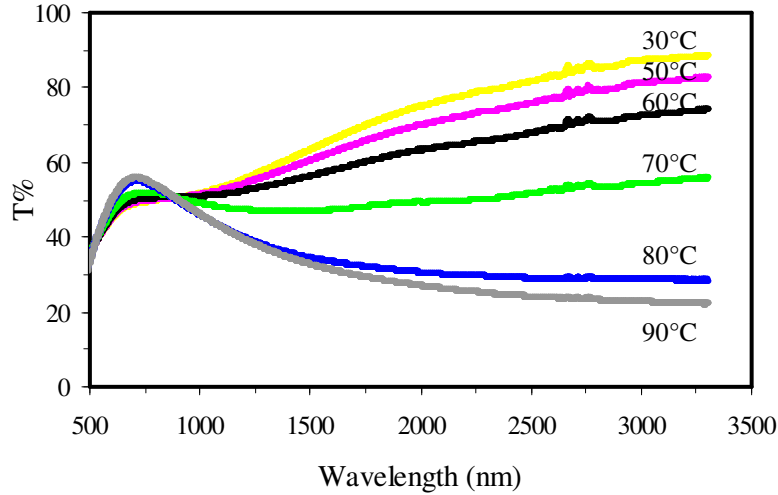


Figure 3: Transmission spectra of a 50 nm VO<sub>2</sub> thin film deposited on a sapphire substrate

## ELECTRICAL CHARACTERIZATION AND MICROWAVE SWITCHING

The SC-M transition of the VO<sub>2</sub> thin films has been investigated during a heating-cooling loop in the 20-100 °C temperature range using a four-probe system showing typical hysteresis cycles. Films on sapphire substrates exhibit a change in resistivity between the SC and the metallic states of the order of 10<sup>3</sup> and a hysteresis width of the order of 5°C whereas for the films deposited on SiO<sub>2</sub>/Si, the contrast is only 10<sup>2</sup> and the hysteresis width 10°C because of the difference in crystalline structure and film quality [12].

To study the switching properties of the VO<sub>2</sub> films, microwave switches (in both shunt and series configurations) were designed and fabricated on both types of substrates using micro fabrication process (wet etching, lift off). A microwave co-planar waveguide (CPW) is realised by thermal evaporation of gold (thickness 200nm). A VO<sub>2</sub> layer (thickness 200nm) is deposited by PLD all over the device and patterned. Finally the CPW metal lines are thickened up to ~800 nm in order to minimize the propagation losses of the signal. As a result, the CPW is “charged” by a VO<sub>2</sub> thin film structure. In shunt configuration, the VO<sub>2</sub> film covers the gap between the signal line (Fig. 4a) like a "bridge" with a width, hereafter labeled W. In series configuration, both parts of the central signal line are linked together through a VO<sub>2</sub> thin film (Fig. 4b) with a length labeled L.



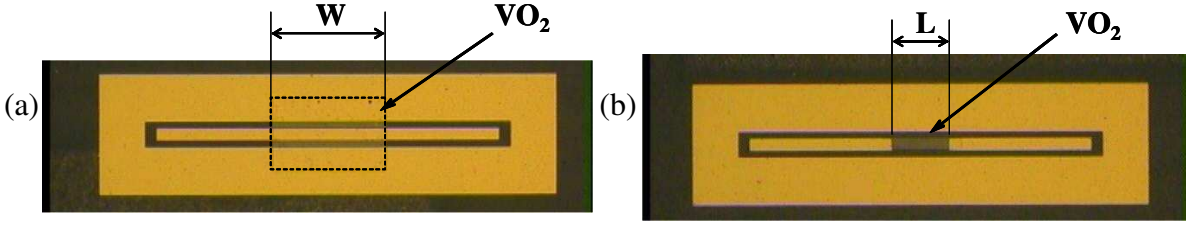


Figure 4: Microwave switch in parallel configuration (a) (length of VO<sub>2</sub>: W=1mm) and (b) series configuration (length of VO<sub>2</sub>: L=500μm)

The evolution of the microwave transmission  $S_{21}$  parameter is reported in figure 5 for a shunt switch on sapphire substrate with a VO<sub>2</sub> width of 1mm (fig. 4a) for different temperatures in the frequency range 500MHz – 35 GHz. At low temperatures, the VO<sub>2</sub> line is in the semiconducting state and introduces only very low losses on the propagation signal ( $|S_{21}| < 3\text{dB}$  at 300K). An increase of temperature leads to a decrease of the resistivity of VO<sub>2</sub>, and thus induces an increase of the losses of the RF signal, eventually leading to a short circuit to the ground ( $|S_{21}| > 30\text{dB}$  at 400K). This result shows the possibility to monitor the attenuation of the signal from a few dB to 30-40 dB with the temperature over a large frequency domain.

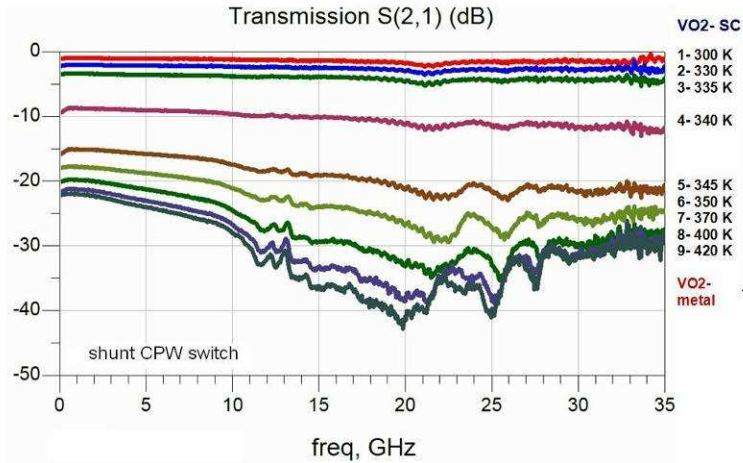


Figure 5: Thermal monitoring of the transmission  $S_{21}$  parameter of a microwave parallel switch (width of VO<sub>2</sub>: W=1mm).

The influence of the width of the VO<sub>2</sub> shunt (W) is studied for devices on sapphire and on SiO<sub>2</sub>/Si (Fig. 6). The insertion losses are about 1-2 dB at 300K when VO<sub>2</sub> is in SC state and is independent of the length of the VO<sub>2</sub> shunt. The average signal attenuation measured at 400K where VO<sub>2</sub> is in the metallic state increases from about 8dB to 25dB for SiO<sub>2</sub>/Si devices when W increases from 250μm to 1mm. These values are weaker than those for sapphire devices which change from about 27dB to 40dB, due to the difference of the VO<sub>2</sub> film structure and of the resistivity jump. These experimental results indicate that the width of the VO<sub>2</sub> shunt can be adapted in order to obtain a chosen attenuation value.

From these results, we consider that the tunability of the attenuation can be reached by using several cascaded VO<sub>2</sub> -shunts on the signal line as shown in figure 7i. The comparison of

the transmission parameter of a CPW line "charged" by a 150 $\mu\text{m}$ -width VO<sub>2</sub> bridge and by three cascaded 150 $\mu\text{m}$ -wide VO<sub>2</sub> "bridges" on a sapphire substrate is given in figure 7.

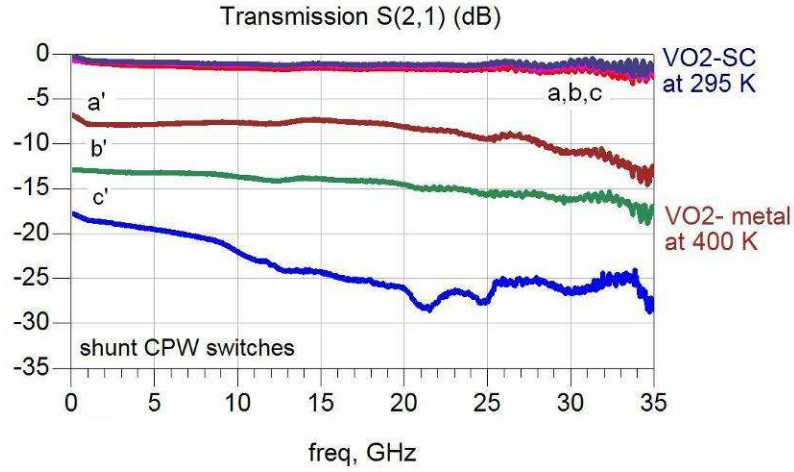


Figure 6:  $S_{21}$  parameter of VO<sub>2</sub> shunt switches on an SiO<sub>2</sub>/Si substrate for different lengths of VO<sub>2</sub> : (a) 250 $\mu\text{m}$ , (b) 500 $\mu\text{m}$  and (c) 1mm. (a,b,c) measured at 300K with SC VO<sub>2</sub> and (a',b',c') measured at 400K with metal VO<sub>2</sub>.

The attenuation level of the switch with one bridge is between 20 and 30 dB and as expected, the attenuation obtained with the switch with three bridges is higher, between 30 and 50 dB, depending on the frequency.

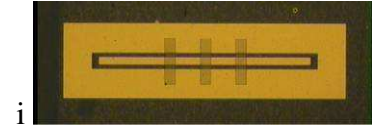
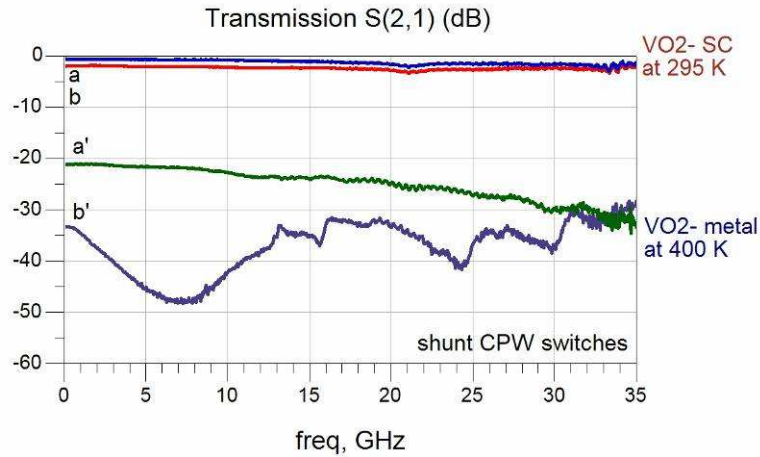


Figure 7:  $S_{21}$  parameter of VO<sub>2</sub> shunt switches on a sapphire substrate: (a) width of VO<sub>2</sub>: W=150 $\mu\text{m}$ , (b) width of VO<sub>2</sub>: 3x150 $\mu\text{m}$  as given in (i). (a,b) measured at 300K with SC VO<sub>2</sub> and (a',b') measured at 400K with metal VO<sub>2</sub>

Similar switching investigations have been undertaken on switches in series configuration (fig. 4b). In this case, when the VO<sub>2</sub> line is semiconducting, i.e. for temperature lower than 341K, the CPW is electrically discontinuous and the signal is strongly attenuated. The signal is transmitted with weak insertion losses when the VO<sub>2</sub> line is metallic, above the transition

temperature. Figure 8 shows the influences of the substrate nature and of the length  $L$  of the  $\text{VO}_2$  line on the transmission parameter in the frequency range 500MHz-35GHz.

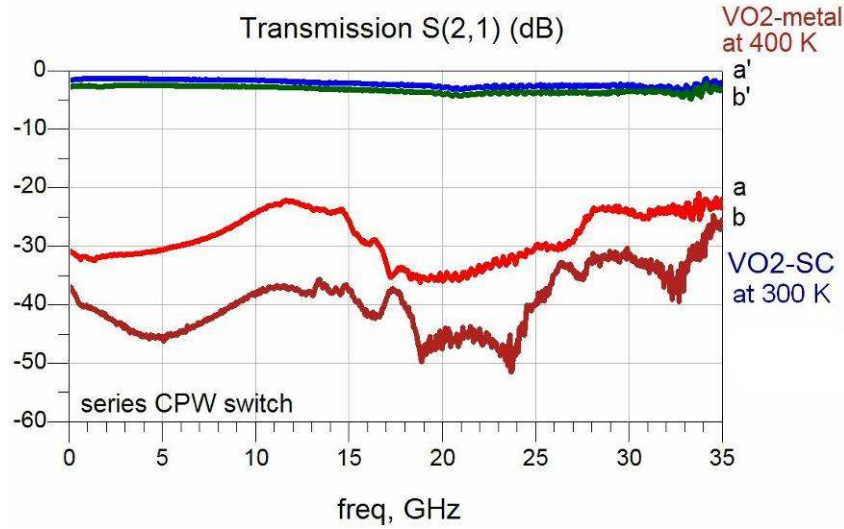


Figure 8:  $S_{21}$  parameter of  $\text{VO}_2$  serial switches on a sapphire substrate for different lengths  $L$  of  $\text{VO}_2$ : (a)  $100\mu\text{m}$ , (b)  $250\mu\text{m}$ . (a,b) measured at 300K with SC  $\text{VO}_2$  and (a',b') measured at 400K with metal  $\text{VO}_2$ .

The insertion losses at 400K are about 3 dB for switches on sapphire. The signal attenuation at 300K increases with  $L$  (average value of about 30 dB for  $L=100\mu\text{m}$  and 40dB for  $L=250\mu\text{m}$ ) because of the increase of the resistance of the  $\text{VO}_2$  line.

In summary, similar switching performances for series and parallel configurations are obtained with insertion losses of about 2-3 dB and an attenuation average of 20-40dB which can be tuned with special shunt devices. These results underline the interest of  $\text{VO}_2$ -based switches for microwave devices.

In all the previous experiments, the transition of the  $\text{VO}_2$  material is thermally activated. Obviously its electrical activation would be preferred, particularly for the tunable cascaded  $\text{VO}_2$ -shunt devices. Moreover the transition is expected to be faster [6].

Therefore to investigate the electrically induced SC-M transition, a special series device was fabricated with 200 nm-thick  $\text{VO}_2$  films with a  $\text{VO}_2$  line of  $40\mu\text{m}$  in length and  $95\mu\text{m}$  in width. The two-terminal device is introduced in an electrical circuit with a cc voltage source, an ammeter and a resistor  $R_S$ . When an increasing DC voltage is applied to the device, the current slowly increases up to a jump corresponding to the SC-M transition. The behavior of the measured current as function of the external applied voltage  $V_{\text{ap}}$  is reported in figure 9 for different values of  $R_S$ .

At a given threshold of the applied voltage (about 12.6V for  $R_S=200\Omega$ , 16.3V for  $R_S = 600\Omega$ , and 20V for  $R_S = 1000\Omega$ ), the current increases abruptly in the circuit, due to the abrupt change of the resistivity of the  $\text{VO}_2$  layer on passing from the SC to the metallic state. The device remains in the activated state as long as the voltage is maintained in the circuit. The presence of two different positive slopes before and after the jump in current underlines the SC-M transition. The ratio of the slopes is higher than about 300, in good agreement with the contrast in the resistivity measured during thermal heating for these specific two-terminal devices.

When the applied voltage is reduced, the  $\text{VO}_2$  film goes back to the SC state with an hysteretic behavior.

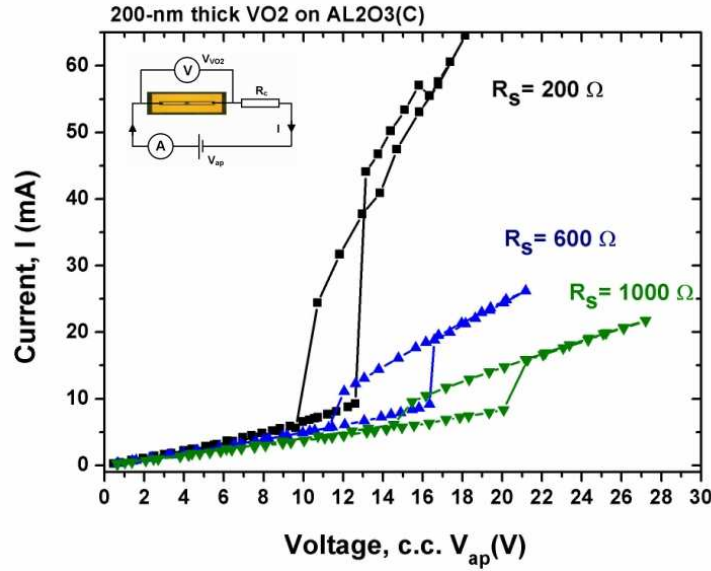


Figure 9: Current (I) – Applied voltage ( $V_{ap}$ ) characteristic of a two-terminal VO<sub>2</sub> device: electrically -induced SC-M transition.

The estimation of the switching time for these switches reported in [12] is as low as some hundreds of nano-seconds, which is better than the current MEMS-based switches and not so far from semiconductor capabilities. Further optimization of the switch and its electrical activation system is in progress in order to improve the time response of these devices.

## DESIGN AND CHARACTERIZATION OF A BAND-STOP FILTER TUNED BY THE VO<sub>2</sub> SC-M TRANSITION

The band-stop filter operating in the 9-13 GHz frequency range consists of a 50  $\Omega$  signal line coupled to four U-shaped resonators, in microstrip configuration. The extremities of each U are linked by a VO<sub>2</sub> film. The activation of the VO<sub>2</sub>-switches induces a change in the frequency resonance of the resonator leading to a rejection band in the signal transmission spectrum. The experimental validation of the filter, according to the simulated characteristics was reported previously [18] using simultaneous thermal activation of the four resonators. Since the individual heating of each VO<sub>2</sub> switch is difficult, requiring the integration of individual micro-heaters which may disturb the signal propagation, we developed a filter using electrical activation of VO<sub>2</sub> switches, as shown in figure 10. The geometrical dimensions of the filters are optimized to obtain a similar filter response in the same frequency domain. Each U-shaped resonator is closed by a VO<sub>2</sub> rectangular switch of size 200 $\mu$ m x 150 $\mu$ m, accompanied by its electrical activation pads.

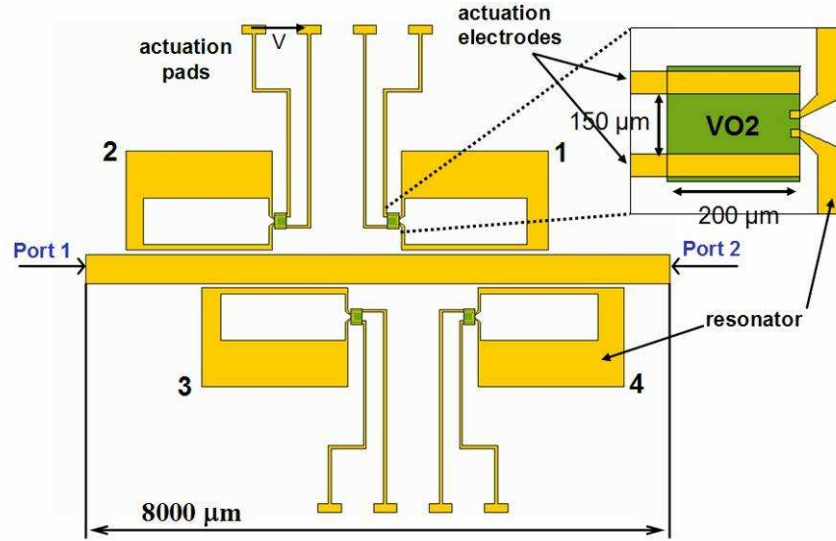


Figure 10: Design of the four pole band stop filter tuned by electrical activation of VO<sub>2</sub>-based resonators.

The simulated response of the filter is shown in Fig. 11. When VO<sub>2</sub> films are in the SC state (at 300K), the switches are not activated and the filter presents a four-pole band rejection with attenuation up to 25dB around 10-11GHz. When all the switches are activated (VO<sub>2</sub> in the metallic state) the rejection band is shifted away from the investigated frequency domain (5-15GHz) and the propagating signal is slightly attenuated.

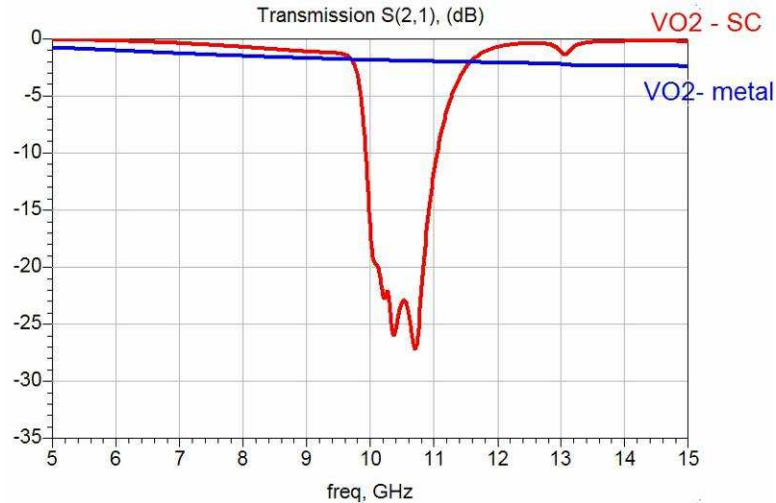


Figure 11: Simulated  $S_{21}$  transmission parameter of the four pole band stop filter when the VO<sub>2</sub> resonators are "open" (VO<sub>2</sub> SC) and "closed" (VO<sub>2</sub> metal).

Figures 12 and 13 present the measured filter transmission for thermal and electrical activation, respectively, of all the resonators. The results are in good agreement with the simulation concerning the transmission contrast and the position of the rejection band, considering the deviation from the theoretical values of the material constants taken into account in the simulation and of the size of the switches. Evidently the measured responses are the same at room temperature (VO<sub>2</sub> switches in insulating state). Thermal or electrical activation of the filter



(Fig.12 and 13, VO<sub>2</sub>-metal) leads to the elimination of the rejection band from the studied frequency range. The relatively high insertion losses of about 4dB are due to the losses of the connecting cables and connectors and also to an impedance miss-match between the connectors and the ends of the transmission line of the filter. The parasitic band between 10 and 12 GHz (Fig. 13) for the electrical activation of all four resonators most probably reflects the influence of the actuation pads and of the wire bonding process during the housing of the filter.

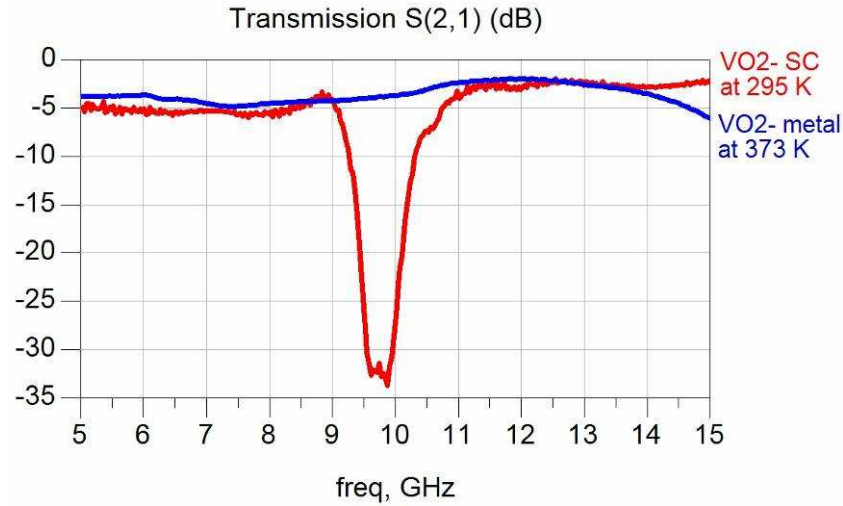


Figure 12: Measured responses of the four pole band stop filter, at room temperature (curve VO<sub>2</sub>-SC) and in the thermally activated state (curve VO<sub>2</sub>-metal).

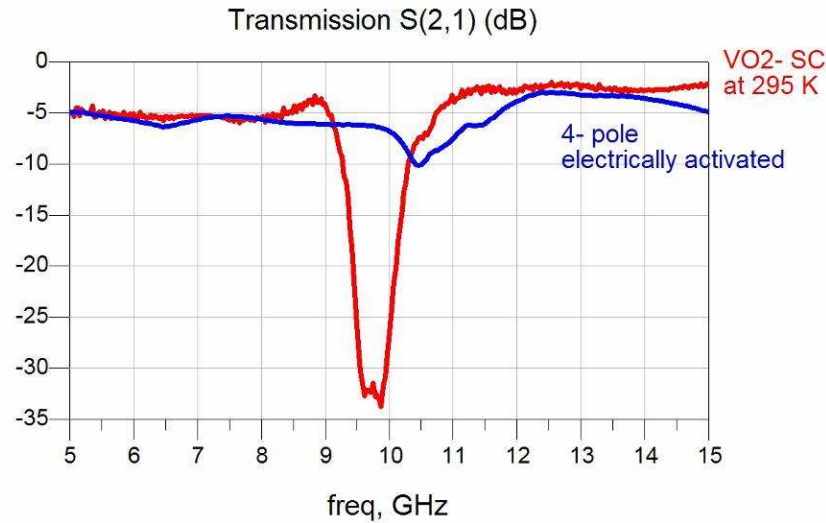


Figure 13: Measured responses of the four pole band stop filter at room temperature (curve VO<sub>2</sub>-SC) and in the electrically activated state (curve 4-pole electrically activated).

The tunability of the filter can be demonstrated by electrical activation of selected resonators. When the VO<sub>2</sub>-switch of two resonators, e.g. resonators 1 and 4 (Fig. 11), becomes metallic, the rejection band of the filter has a central frequency of about 9.8GHz and a full width at half maximum (FWHM) of 0.3 GHz, as shown in figure 14. The electrical activation of two other resonators, e.g. resonators 2 and 3 in Fig. 11, leads to a displacement of the central frequency of the filter to lower frequencies (Fig. 15) at 9.55 GHz (FWHM = 0.5GHz). Note that the parasitic

influence also appears when electrical actuation of individual resonators was further substracted from the measured responses presented below.

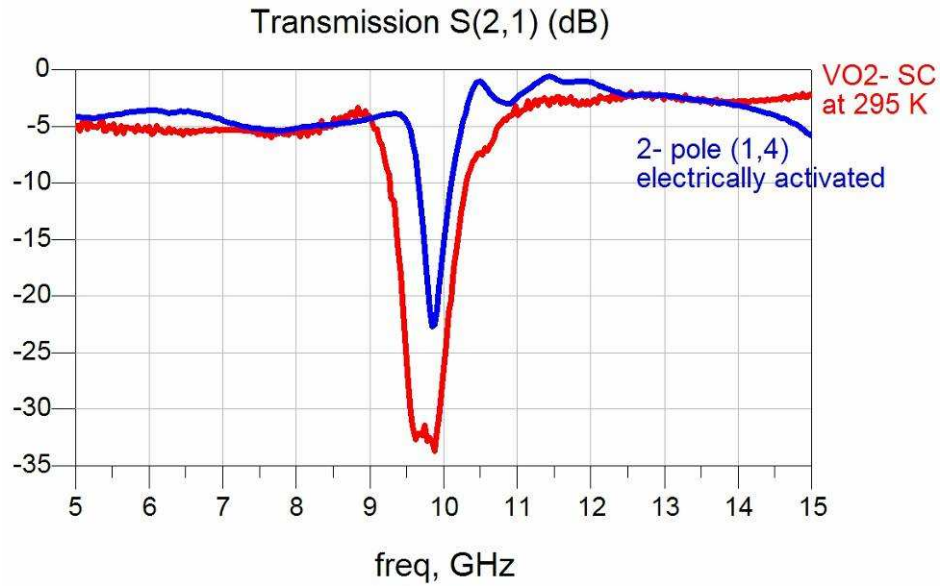


Figure 14: Measured response of the four pole band stop filter, when resonators 1 and 4 (Fig. 11) are simultaneously electrically activated compared to the measured response without activation (curve VO2-SC).

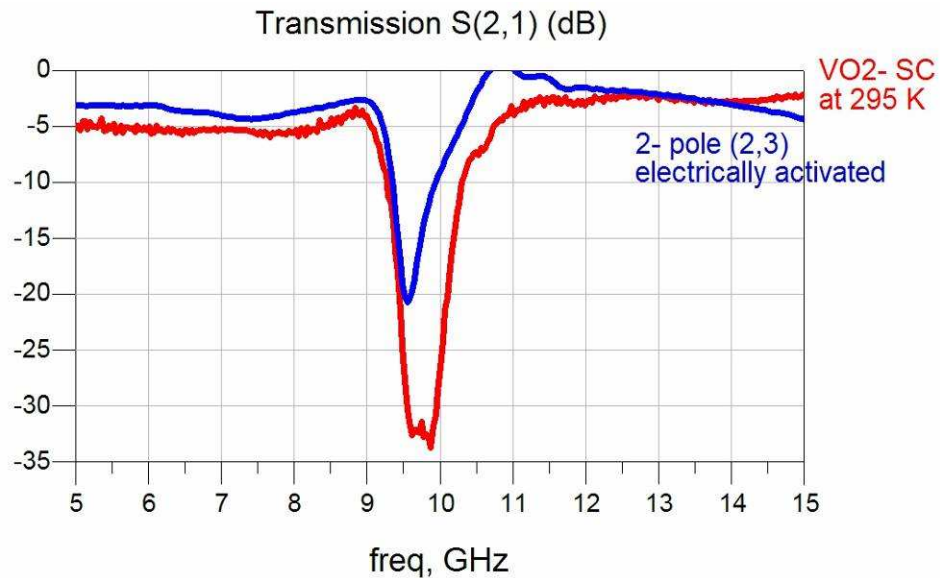


Figure 15: Measured responses of the four pole band stop filter, when two resonators (2,3) (Fig. 11) are electrically activated compared to the measured response without activation (curve VO2-SC).

## CONCLUSIONS

Vanadium dioxide thin films were deposited by in situ pulsed laser deposition. Their microstructure and crystalline orientation, which depend on the substrate (i.e. monoclinic on sapphire and orthorhombic on SiO<sub>2</sub>/Si), control their physical properties: resistivity, optical transmission,... These films are integrated in millimeter-wave coplanar switching devices in both configurations (shunt, series). The thermal commutation of switches leads to an attenuation of 30 dB of the signal propagation over a very wide band frequency 500MHz-35 GHz and can be tuned by choosing appropriate geometrical parameters. The VO<sub>2</sub>-based switches were used to design a four pole band stop filter. Electrical activation of individual switches allows the tuning of the filter in the frequency range 9-11 GHz.

In conclusion, VO<sub>2</sub>-based switches are promising candidates for realizing efficient and simple microwave switches as well as more complex devices for telecommunication applications.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to acknowledge the financial support from “Agence Nationale de la Recherche” (ANR, France) through the research grant “Admos-VO2” no. JC07\_190648.

## REFERENCES

1. D. M. Pozar, *Microwave Engineering – 3rd ed.*, J. Wiley & Sons, (2005).
2. G. M. Rebeiz, *RF MEMS Theory, Design, and Technology*, New Jersey: J. Wiley & Sons, (2003).
3. F. Morin, Phys. Rev. Lett. 3, 34 (1959).
4. A. Zylbersztejn, N.F. Mott, Phys. Rev. B, 11[11], 4383 (1975)
5. H.W. Verleur, A. S. Barker Jr., C.N. Berglund, Phys. Rev. 172 [3], 788 (1968).
6. G. Stefanovich, A. Pergament, D. Stefanovich, J. Phys.: Condens. Matter 12, 8837 (2000).
7. C. Chen, R. Wang, L. Shang, C. Guo, Appl. Phys. Lett. 93, 171101 (2008).
8. A. Cavalleri, C. Tóth, C.W. Siders, J.A. Squier, F. Ráksi, P. Forget, J.C. Kieffer, Phys. Rev. Lett. 87(23), 237401 (2001).
9. T. Ben-Messaoud, G. Landry, J.P. Gariépy, B. Ramamoorthy, P.V. Ashrit, A. Haché, Opt. Commun., doi:10.1016/j.optcom.2008.09.027.
10. L.A.Luz de Almeida, G.S. Deep, A.M.Nogueira Lima, IEEE Trans. Instrument. Measure. 50[4], 1020 (2001).
11. S. Chen, H. Ma, X. Yi, H. Wang, X. Tao, M. Chen, X. Li, C. Ke, Infrared Physics 1 Technology 45, 239 (2004).
12. F. Dumas-Bouchiat, C. Champeaux, A. Catherinot, A. Crunteanu and P. Blondy, Appl. Phys. Lett. 91, 223505 (2007).
13. D B Chrisey and G K Hubler, *Pulsed Laser Deposition of Thin Films* New York: Wiley, (1994).

14. R. Eason, *Pulsed laser deposition of thin films; Applications-led growth of functional materials*, Wiley Interscience, (2007).
15. C H Griffith and H K Eastwood, J. Appl. Phys.45, 2201 (1974).
16. D. Youn, J. Lee, B. Chae, H. Kim, S. Maeng, and K. Kang, J. Appl. Phys.95, 1407 (2004).
17. M. M. Qazilbash, M. Brehm, Byung-Gyu Chae,P.-C. Ho, G. O. Andreev, Bong-Jun Kim, Sun Jin Yun, A. V. Balatsky, M. B. Maple, F. Keilmann, Hyun-Tak Kim,3 D. N. Basov, Science 318, 1750 (2007).
18. J. Givernaud, C. Champeaux, A. Catherinot, A. Pothier, P. Blondy, A. Crunteanu, IEEE MTT-S, IMS 2008, Atlanta, WEP1D-02.

# Reconfigurable Bandpass Filter Based on Split Ring Resonators and Vanadium Dioxide (VO<sub>2</sub>) Microwave Switches

David Bouyge<sup>#1</sup>, Aurelian Crunteanu<sup>\*2</sup>, Jean-Christophe Orlianges<sup>\*3</sup>, Damien Passerieux<sup>\*4</sup>, Corinne Champeaux<sup>\*\*5</sup>, Alain Catherinot<sup>\*\*6</sup>, Adolfo Velez<sup>#7</sup>, Jordi Bonache<sup>#8</sup>, Ferran Martin<sup>#9</sup>, Pierre Blondy<sup>\*10</sup>

<sup>#</sup>*CIMITEC, Departament d'Enginyeria Electronica, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Spain*

<sup>1</sup>david.bouyge@uab.cat

<sup>7</sup>Adolfo.Velez@uab.cat

<sup>8</sup>Jordi.Bonache@uab.es

<sup>9</sup>Ferran.Martin@uab.es

<sup>\*</sup>*XLIM Research Institute -CNRS, University of Limoges, 123 Avenue Albert Thomas, 87060 Limoges, France*

<sup>2</sup>aurelian.crunteanu@xlim.fr

<sup>3</sup>jean-christophe.orlianges@xlim.fr

<sup>4</sup>damien.passerieux@xlim.fr

<sup>10</sup>pierre.blondy@xlim.fr

<sup>\*\*</sup>*SPCTS -CNRS, University of Limoges, 123 Avenue Albert Thomas, 87060 Limoges, France*

<sup>5</sup>corinne.champeaux@unilim.fr, <sup>6</sup>alain.catherinot@unilim.fr

**Abstract** — In this paper, we present the design, fabrication and characterization of the first tunable bandpass filter that combines split ring resonators (SRRs) and vanadium dioxide (VO<sub>2</sub>)-based microwave switches. The device consists on a pair of coupled SRRs, feed by means of tapped microstrip lines, that can be connected to metallic patches by electronically activating the VO<sub>2</sub>-based switches. Through the fast and reversible Semiconductor-to-Metal Transition (SMT) of the VO<sub>2</sub> thin films, the electrical characteristics of the SRRs are modified so that their resonance frequency, and as a result the central frequency of the bandpass filter can be electrically tuned. The fabricated filter, designed to operate in the X-band, exhibits a tuning range of nearly 10% where its electrical characteristics (bandwidth, insertion losses, etc.) are roughly preserved.

**Index Terms** — Bandpass filters (BPFs), intelligent materials, split ring resonators (SRRs), microwave filters, switching, tunable filters.

## I. INTRODUCTION

The synthesis of tunable microwave and millimeter wave devices is a subject of interest to enhance adaptability of telecommunication circuits and systems. In recent years, with the huge impact of metamaterials on microwave circuit design, there have been extensive efforts to develop reconfigurable components on the basis of tunable metamaterial resonators and tunable metamaterial transmission lines.

In a previous paper, some of the authors proposed the synthesis of tunable stop-band filters by using split ring resonators (SRRs) loaded with varactor diodes (placed between the inner and the outer rings) [1],[2]. The resulting particle, called varactor-loaded split ring resonator (VLSRR), exhibits an electronically-controlled resonance frequency due to the presence of the diode varactor. This particle has been subsequently used by other authors in microstrip configurations to realize compact tunable notch filters and resonators [3],[4]. Vélez *et al.* demonstrated that the varactor-loaded complementary split ring resonator (VLCSRR), which

is the dual counterpart of the VLSRR, is useful for the design of negative permeability and left-handed microstrip lines with electronic tuning capability [5]. Likewise, Gil *et al.* [6] realized a tunable stopband filter by etching CSRRs in the central strip of a coplanar waveguide loaded with RF-MEMS variable capacitors integrated on top of them (instead of varactor diodes). We would like also to note that tunability can be also achieved by external electric and/or magnetic fields or by temperature, in structures based on ferroelectric and ferromagnetic materials [7],[8].

However, the performance of tunable microwave systems is generally limited by losses, power consumption, non-linear behavior and large dimensions of semiconductor components, or by the yet-to-be-proved reliability and the relatively slow commutation of RF-MEMS switches. Within this context, an original alternative has been recently explored for tuning by using vanadium dioxide (VO<sub>2</sub>). This material exhibits a reversible semiconductor-metal transition (SMT) [9],[10] that results in an abrupt change of its electrical properties. Indeed, its resistivity decreases 3 to 5 orders in magnitude when VO<sub>2</sub> passes from the semiconductor state to the metallic one. This transition can be driven by various external excitations: thermally (the transition temperature is 68°C), optically or electrically by charge injection. The very fast (under 1 ps) optically- and electrically-induced MIT makes the VO<sub>2</sub> a very attractive material for integration in reconfigurable microwave systems, where the switching speed is a desired characteristic [11]. Thus, some of the authors presented the first reconfigurable microwave stop-band filters using the thermally and electrically-actuation of VO<sub>2</sub>-based switches [12].

In this paper we present a tunable bandpass filter operating in the X-band which combines for the first time the miniaturizing power of metamaterial resonators (SRRs) with the huge switching possibilities offered by the SMT in thin films of VO<sub>2</sub>.



## II. DESIGN OF THE PROPOSED FILTER

The topology of the bandpass filter, shown in Fig. 1(a), was proposed in [13]. It consists on a pair of coupled SRRs feed by  $50\ \Omega$  microstrip transmission lines. In the proposed configuration, the electrical coupling between these two adjacent elements results in the bandpass behavior of the filter [14]. Such configuration provides also transmission zeros, present at both sides of the band, which are relevant for frequency selectivity improvement and are caused by the feeding structure, as discussed in [15]. Since the central frequency of the filter depends directly on the resonance frequency of the SRRs, by tuning the SRRs we can tailor the position of the filter pass band.

### A. Dynamic tuning principle

As shown in Fig. 1, our approach consists on placing patches of  $\text{VO}_2$  material between the external ring of each SRR and several metallic patches to provide a dynamic tuning of the response (each  $\text{VO}_2$  patch acts as a switch).

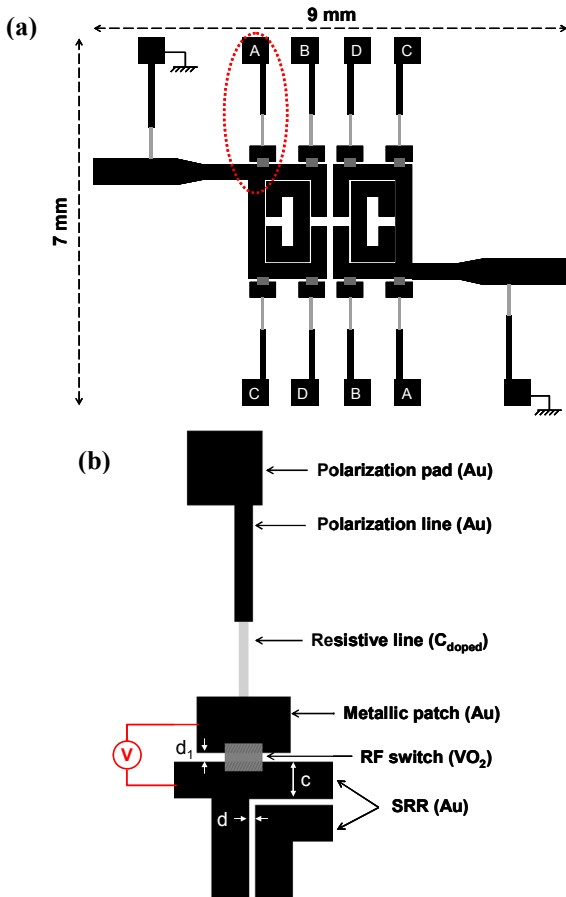


Fig. 1. Layout of the fabricated tunable bandpass filter (a) and overscale view of one tunable element (b). The size of metallic patches and  $\text{VO}_2$ -based switches are  $500 \times 300\ \mu\text{m}^2$  and  $200 \times 150\ \mu\text{m}^2$ . Width and distance between rings of SRR are  $c = 300\ \mu\text{m}$  and  $d = 30\ \mu\text{m}$ . The distance between the two SRRs is  $125\ \mu\text{m}$ , and the one between external rings and metallic patches is  $d_1 = 50\ \mu\text{m}$ .

Each  $\text{VO}_2$ -based switch can be independently electrically actuated by two electrodes: the external rings act as common DC ground electrode and each metallic patch as DC independent electrode. DC currents are supplied to the electrodes through metallic pads and lines of polarization and resistive lines. Owing the actuation of one or several switches, which pass from a semiconductor state to a metallic state, the corresponding metallic patches are electrically connected to the SRRs. This modifies the electrical characteristics of the SRR (resonance frequency) which leads to a shift in the response of the filter. Taking into account that both SRR must always present the same resonance frequency, we obtain a 4-bit (called A, B, C and D) tunable filter.

### B. Filter characteristics

The tunable filter was designed to operate around 10 GHz by using the *Agilent Momentum* electromagnetic simulator. The active part of the bandpass filter formed by the two SRR elements is only  $6.8\ \text{mm}^2$  (i.e.  $\lambda_g^2 / 14$ , where  $\lambda_g$  is the guided wavelength at resonance), and the whole area of the all-integrated device is  $63\ \text{mm}^2$  (see Fig. 1a). We note that these dimensions are necessary to test the tunable response of the filter, but the area could be reduced by 72 % without any change in its behavior.

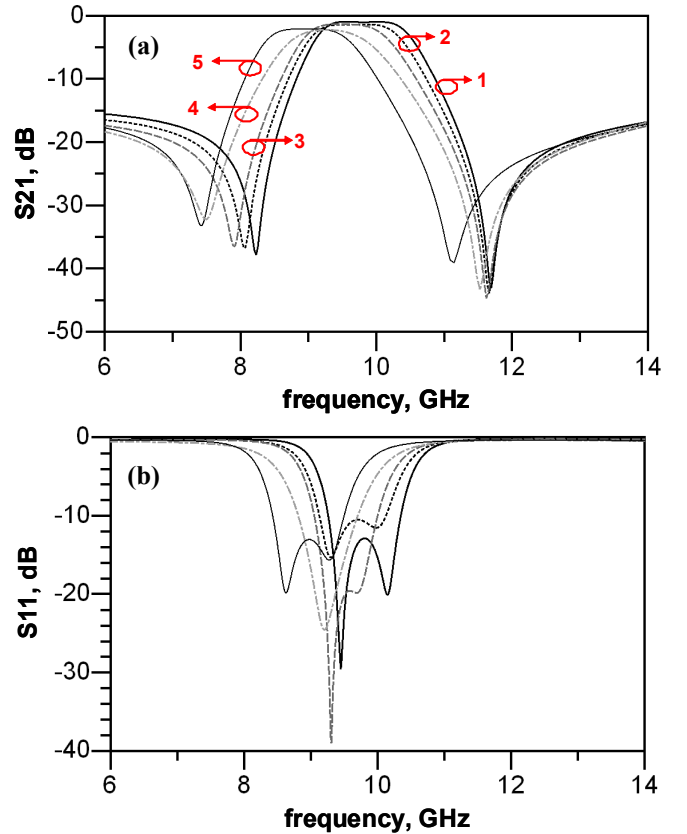


Fig. 2. Simulated insertion (a) and return (b) losses for different combinations of  $\text{VO}_2$ -based switches actuated.

The simulated S-parameters of the device are displayed in Fig. 2. The bold solid lines (1) correspond to the response when none of the switches is actuated. Insertion losses are lower than 1 dB and return losses are better than 12 dB in the bandpass.

TABLE I  
SUMMARY OF VO<sub>2</sub>-BASED SWITCHES COMBINATIONS  
“0”: VO<sub>2</sub> AT INSULATOR STATE  
“1”: VO<sub>2</sub> AT METTALIC STATE

Combination	Bit value			
	A	B	C	D
1	0	0	0	0
2	1	0	0	0
3	1	0	1	0
4	1	1	1	0
5	1	1	1	1

Other filter responses corresponding to different combinations of switches simultaneously actuated (reported in Table I) are depicted in Fig. 2. Depending on the number of actuated switches, the central frequency of the bandpass filter can be tuned in a range from 9 GHz to 9.8 GHz while maintaining insertion losses less than 2.2 dB and roughly preserving the same filter bandwidth.

### III. FABRICATION AND MEASUREMENTS

The device was fabricated in a clean room environment using low-cost, batch and standard micro fabrication process (only three photolithography mask levels). First, the VO<sub>2</sub> film was deposited using reactive laser ablation on a 500  $\mu$ m-thick Sapphire substrate ( $\epsilon_r = 9.8$ ). The 200 nm-thick VO<sub>2</sub> layer was further patterned using wet etching. The measured resistivities are 70 000  $\Omega$ /square when VO<sub>2</sub> is at semiconductor state and 17  $\Omega$ /square when it becomes metallic. It follows the lift-off of a 50 nm-thick doped Carbon layer, deposited by reactive laser ablation, to realize the 6 K $\Omega$  resistive lines. Then, the metallic structure is obtained by the thermal evaporation of a Cr/Au seed layer for the electrolytic deposition of a 1.5  $\mu$ m-thick gold film that is finally patterned by wet-etching.

The all-integrated fabricated microwave device has been mounted in a metallic housing and connected to two SMA connectors for the RF measurements (Fig. 3). To avoid damaging the device during the characterization, the polarization pads are connected to external ports by wire bonding. The values of voltage and current applied to the VO<sub>2</sub>-based switches to reach the SMT are respectively 60 V and 30 mA.

The measured insertion and return losses for the fabricated filter were taken by means of an *Agilent 8722 network analyzer* in the 1-20 GHz frequency range (the used calibration do not take into account losses induced by the SMA connectors).

The simulated and measured insertion and return losses of the filter, corresponding to the extreme cases of none and all of the VO<sub>2</sub>-based switches actuated, are presented on Fig. 4. There is good agreement between the simulation and the experiment, except that measured insertion losses are higher than those predicted by the simulation. This is due to the presence of silver epoxy which acts as metallic contact between the transmission lines and the SMA connectors. As anticipated, the frequency response exhibits two transmission zeros, and filter characteristics are roughly preserved within the tuning range, which is close to 10%.

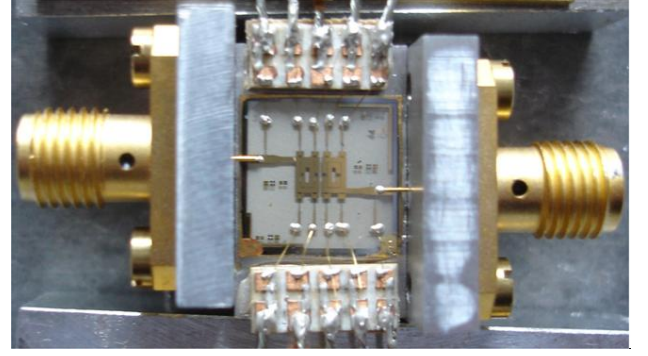


Fig. 3. Photograph of the fabricated tunable bandpass filter based on VO<sub>2</sub> material, mounted in a metallic housing for performance measurement.

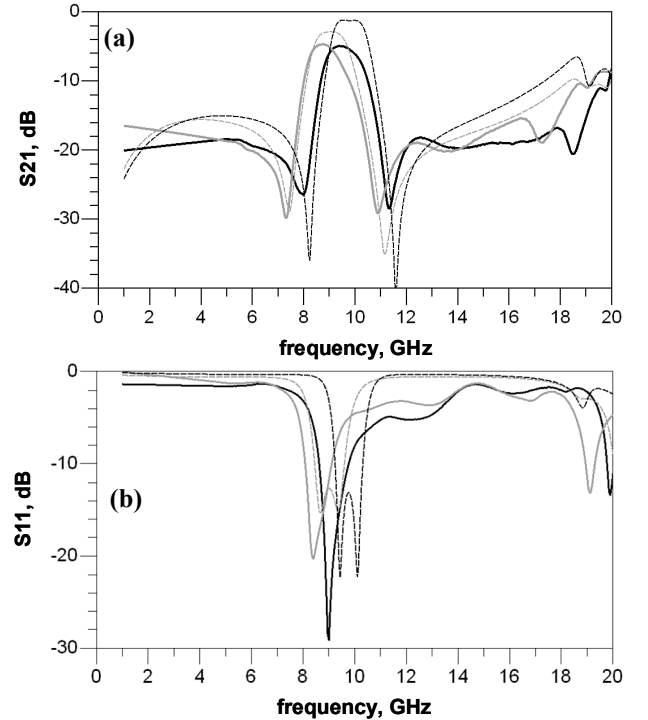


Fig. 4. Simulated (dotted lines) and measured (solid lines) insertion (a) and return (b) losses when all VO<sub>2</sub>-based switches are at semiconductor state (black) and when they are all actuated (grey).

#### IV. CONCLUSION

In conclusion, tunable bandpass filters based on a combination of split ring resonators and vanadium dioxide based switches have been presented for the first time. Specifically, a band pass filter based on a pair of electrically coupled SRRs has been designed and fabricated. Filter dimensions are small, the achieved tuning range is close to 10%, filter characteristics are preserved over the tuning range, and the filter response exhibits a pair of transmission zeros which improve frequency selectivity. The presented work constitutes a proof of concept demonstrator of the use of electrically activated VO<sub>2</sub>-based switches in combination with electrically small resonators to achieve compact tunable filters. This approach represents an alternative to existing technologies on tuning, where the limiting aspects (losses, reliability, etc.) are alleviated.

#### ACKNOWLEDGEMENT

This work has been supported by Spain-MEC (project contract TEC2007-68013-C02-02 META-INNOVA) and by Spain-MCI (project CONSOLIDER-INGENIO 2010 CSD2008-00066). Ferran Martin is in debt with the ICREA Foundation for giving him an ICREA Academia award. The research activities of David Bouyge are financed by the Universitat Autònoma de Barcelona.

Aurelian Crunteanu will like to acknowledge the financial support from France's National Research Agency (ANR) through the research grant "Admos-VO<sub>2</sub>" no. JC07\_190648.

#### REFERENCES

- [1] I. Gil, F. Martin, J. Bonache, and J. Garcia-Carcia, "Tunable metamaterial transmission lines based on varactor loaded split rings resonators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 54, no. 6, pp. 2665-2674, June 2006.
- [2] I. Gil, J. Garcia-Carcia, J. Bonache, F. Martin, M. Sorolla, and R. Marqués, "Varactor-loaded split rings resonators for tunable notch filters at microwave frequencies," *Electronics Letters*, vol. 40, pp. 1347-1348, October 2004.
- [3] X. Yongxuan, S. Donglin, W. Yazhou, Z. Yan, "The laminating tunable notch filter with single split ring resonator," *2006 4<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics*, pp. 464-467, August 2006.
- [4] H. Li, Y. Zhang, L. He, "Tunable filters based on the varactor-loaded split-ring resonant structure coupled to the microstrip line," *2008 International Conference on Microwave and Millimeter wave Technology*, vol. 3, pp. 1580-1582, April 2008.
- [5] A. Vélez, J. Bonache, F. Martin, "Varactor-loaded Complementary Split Rings Resonators (VLCSRR) and their application to tunable metamaterial transmission lines," *IEEE Microwave and Wireless Component Letters*, vol. 18, pp. 28-30, January 2008.
- [6] I. Gil, F. Martin, X. Rottenberg, W. De Raedt, "Tunable stop-band filter at Q-band based on RF-MEMS metamaterials," *Electronics Letters*, vol. 43, no.21, pp. 1153-1154, October 2007.
- [7] E. Ozbay, K. Aydin, S. Butun, K. Kolodziejek, D. Pawlak, "Ferroelectric based tuneable SRR based metamaterial for microwave applications," *2007 European Microwave Conference*, pp. 497-499, October 2007.
- [8] M. Gil, C. Damm, A. Giere, M. Sazegar, J. Bonache, R. Jakoby, F. Martín, "Electrically tunable split-ring resonators at microwave frequencies based on Barium-Strontium Titanate thick-film," *Electronics Letters*, vol. 45 (8), pp. 417-19, April 2009.
- [9] G. Stefanovich, A. Pergament, and D. Stefanovich, "Electrical switching and Mott transition in VO<sub>2</sub>," *Journal of Physics : Condensed Matter*, vol. 12, no.41, pp. 8837-8845, October 2000.
- [10] F. Dumas-Bouchiat, C. Champeaux, A. Catherinot, A. Crunteanu, and P. Blondy, "RF-microwave switches based on reversible semiconductor-metal transition of VO<sub>2</sub> thin films synthesized by pulsed-laser deposition," *Applied Physics Letters : Condensed Matter*, vol. 91, no.22, pp. 223505-1-3, November 2007.
- [11] A. Cavalleri, Cs. Toth, C.W. Siders, J.A. Squier, F. Raksi, P. Forget and J.C. Kieffer, "Femtosecond Structural Dynamics in VO<sub>2</sub> during an Ultrafast Solid-Solid Phase Transition," *Physical Review Letters*, vol. 87, no.23, pp. 237401-1-4, November 2001.
- [12] J. Givernaud, C. Champeaux, A. Catherinot, A. Pothier, P. Blondy, and A. Crunteanu, "Tunable band stop filters based on Metal-Insulator Transition in vanadium dioxide thin films," *2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp. 1103-1106, June 2008.
- [13] C. Cenk, A. Sondas, Y.E. Erdemli, "Tunable split ring resonator microstrip filter design," *2006 Mediterranean Microwave Symposium*, September 2006.
- [14] J-S. Hong, and M.J. Lancaster, "Couplings of microstrip square open-loop resonators for cross-coupled planar microwave filters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 44, no. 12, pp. 2099-2109, November 1996.
- [15] C-M. Tsai, S-Y. Lee, and C-C. Tsai, "Performance of a Planar Filter Using a 0° Feed Structure", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, pp. 2362-2367, October 2002.

## 2.5. LIMITEURS DE PUISSANCE LARGE BANDE BASES SUR LA TRANSITION ISOLANT-METAL DU VO<sub>2</sub> [53]

L'augmentation constante des niveaux de puissance dans les dispositifs microondes pour les systèmes de télécommunication, nécessite l'utilisation de dispositifs de limitation de puissance pour les éléments les plus sensibles de la chaîne de réception comme par exemple les amplificateurs faible bruit (LNA). Les solutions existantes permettant de limiter cette puissance sont des dispositifs à base de diodes PIN, de transistors MESFET ou leur combinaison [54]. Néanmoins, elles ne couvrent que de faibles bandes de fréquences pour des valeurs de puissance bien spécifiques. Des solutions alternatives prometteuses, comme l'intégration de films minces de matériaux supraconducteurs sur des guides d'onde coplanaires (CPW) ont déjà été proposées [55], même si leur température d'utilisation est très basse (cryogénie).

Dans cette partie nous présentons un concept innovant pour la réalisation de dispositifs limiteurs de puissance RF/microonde en technologie coplaire basé sur la transition réversible isolant- métal (MIT) du dioxyde de vanadium (VO<sub>2</sub>). Ces dispositifs auto-actionnables en fonction de la puissance incidente permettent de transmettre un signal RF quand le matériau est à l'état semi-conducteur (avec des pertes d'insertion <0.7 dB) et de l'atténuer quand le signal transmis atteint une puissance seuil rendant le VO<sub>2</sub> métallique. Ces dispositifs très simples, peuvent facilement être intégrés comme circuits de protection large bande dans de nombreux dispositifs microondes.

L'image par microscopie optique du dispositif proposé est présentée sur la Figure 2.36. Celui-ci **est constitué d'un guide coplaire CPW « chargé » par des couches minces de VO<sub>2</sub> reliant la ligne de signal à la masse** (conception très similaire à un commutateur à VO<sub>2</sub> en configuration parallèle, présenté dans la section 2.3). Les circuits sont fabriqués en salle blanche. La première étape consiste à déposer une couche mince de VO<sub>2</sub> d'environ 250 nm par ablation laser réactive (PLD) sur un substrat de saphir c à partir d'une cible de vanadium pure en atmosphère d'oxygène. La couche de VO<sub>2</sub> ainsi obtenue est ensuite gravée par voie humide pour définir les zones actives du circuit, et ensuite les lignes coplanaires en or sont déposées par évaporation thermique suivie d'une électrolyse d'or.

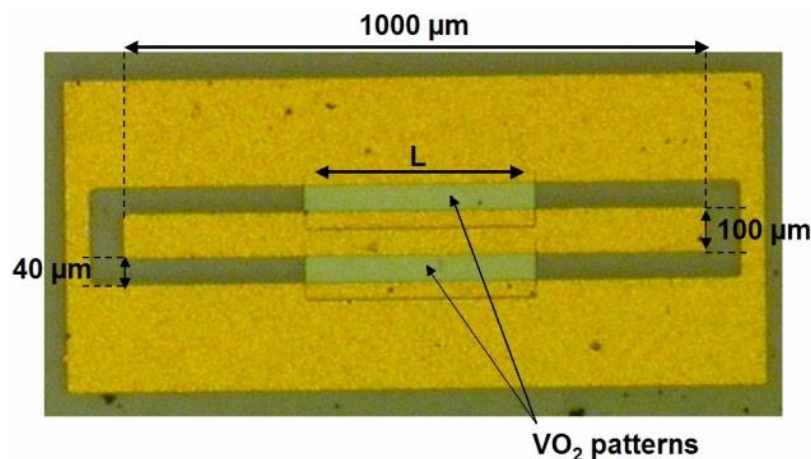


Figure 2.36. Image par microscopie optique d'un guide CPW chargé avec une structure en couches minces de 450 µm de VO<sub>2</sub>.

Avant de tester le comportement du circuit exposé aux signaux de puissance RF, nous avons simulé sous ADS Momentum et mesuré les paramètres S du dispositif à température ambiante et à 80°C (le VO<sub>2</sub> étant dans l'état semi-conducteur et métallique à ces températures respectives). Le comportement d'un commutateur à VO<sub>2</sub> en configuration parallèle est observé sur la Figure 2.37. Ainsi, à température ambiante le VO<sub>2</sub> est à l'état isolant et laisse passer le signal dans la ligne avec peu d'atténuation (<0.7 dB). En chauffant le dispositif à 80°C, le VO<sub>2</sub> devient métallique et le signal est

court-circuité à la masse entraînant une forte atténuation ( $>32$  dB). La différence entre les résultats de simulation et de mesure quand le  $\text{VO}_2$  est dans l'état métallique (courbes c et d sur la Figure 2.37) est due à la non-homogénéité de l'épaisseur du  $\text{VO}_2$ . Ce paramètre est en effet critique et fait fortement varier la résistance du matériau à l'état métallique.

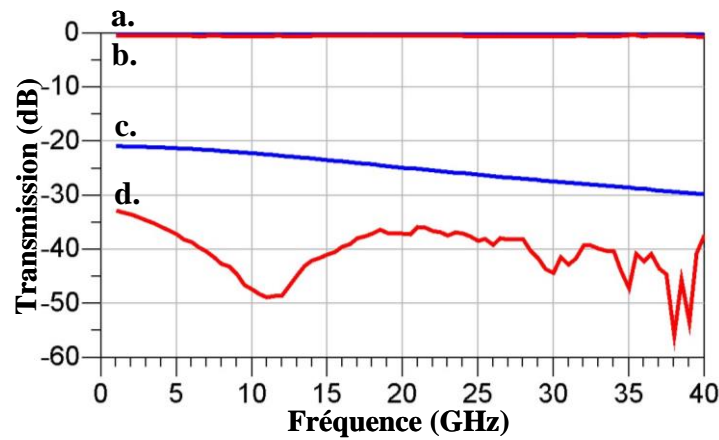


Figure 2.37. Résultats de simulation et de mesures du dispositif de la Figure 2.36 quand le  $\text{VO}_2$  est semi-conducteur (simulation a et mesure b) et quand  $\text{VO}_2$  est métallique (simulation c et mesure d)

La caractérisation en puissance RF du dispositif est réalisée avec une source de puissance variable à 10 GHz. Le circuit est placé sous atmosphère ( $\text{N}_2$ ) et température contrôlés et est testé sous pointes. Les résultats de mesure montrent que la puissance incidente est transmise via le guide coplanaire jusqu'à une valeur seuil (1 W dans le cas où la largeur de la structure de  $\text{VO}_2$  est de 450  $\mu\text{m}$ ) (Figure 2.38a et schématisé sur la Figure 2.38b). A partir de ce seuil de puissance, sous l'action combinée de la dissipation thermique et du flux de courant dans la ligne de transmission, une partie ou tout le motif de  $\text{VO}_2$  devient métallique (pour des puissances supérieures à 1 W), voir Figure 2.38b, et le dispositif réfléchit alors fortement le signal RF. Quand la puissance incidente diminue, le motif de  $\text{VO}_2$  reste métallique jusqu'à environ 100 mW puis redevient semi-conducteur.

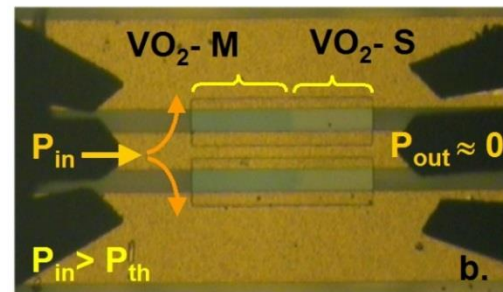
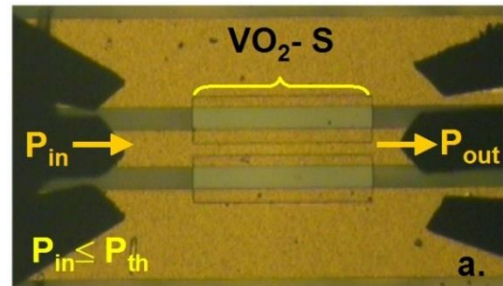
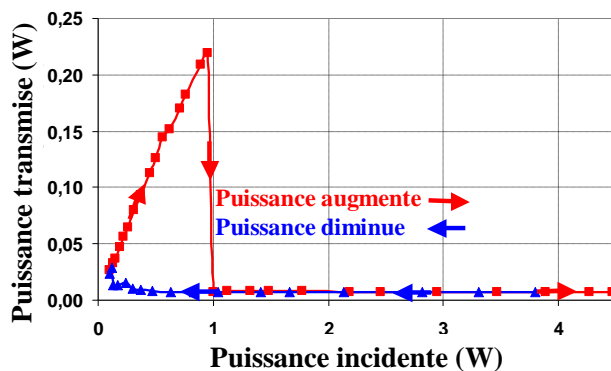


Figure 2.38. a. Puissance transmise en fonction de la puissance RF incidente dans un guide CPW chargé avec une structure de 450  $\mu\text{m}$  de large de  $\text{VO}_2$  et b. Principe de fonctionnement du dispositif limiteur de puissance.

Pour évaluer l'impact de la température extérieure sur le dispositif, des mesures similaires ont été menées à différentes températures sur un dispositif avec une structure de  $\text{VO}_2$  de 100  $\mu\text{m}$  de large. Il



apparaît clairement (Figure 2.39a) que la puissance seuil nécessaire au basculement du VO<sub>2</sub> à l'état métallique diminue fortement quand la température extérieure augmente. De manière similaire, différentes tensions de commande ( $V_{DC}$ ) sont appliquées avec les pointes RF entre la ligne centrale et la ligne de masse d'un guide CPW muni d'une structure de VO<sub>2</sub> de 400  $\mu\text{m}$  de large, soumettant le VO<sub>2</sub> au passage d'un courant. Dans ces conditions, la puissance seuil nécessaire au basculement du VO<sub>2</sub> diminue quand  $V_{DC}$  augmente (Figure 2.39b).

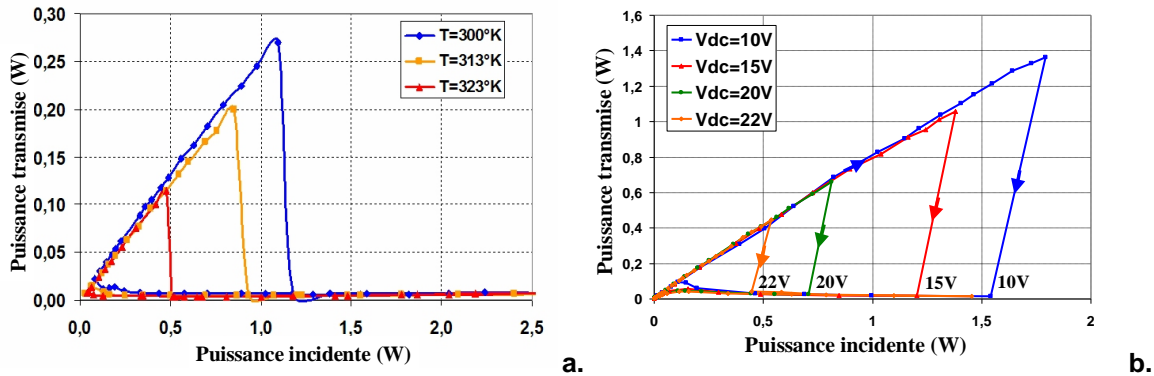


Figure 2.39. a. Puissance transmise dans un dispositif limiteur de puissance en fonction de la puissance RF incidente dans un guide CPW chargé avec une structure de 100  $\mu\text{m}$  de large de VO<sub>2</sub> pour différentes températures et b. la même dépendance pour un dispositif chargé avec une structure de 400  $\mu\text{m}$  de large de VO<sub>2</sub> pour différentes tensions appliquées entre la ligne centrale et la masse du guide CPW.

Le dispositif présenté fonctionne sur une large bande de fréquence (100 MHz à 40 GHz) et constitue un premier pas dans la réalisation d'un véritable limiteur de puissance à base de VO<sub>2</sub>, permettant aussi de mieux comprendre le comportement du matériau soumis à un signal RF de puissance.

Pour obtenir le comportement d'un véritable limiteur de puissance (limitation du signal à un certain niveau mais avec la possibilité de transmettre à travers le dispositif ce niveau de puissance après le phénomène de limitation) nous avons réalisé un dispositif incluant des ensembles de diviseurs/combineurs de puissance RF (« boucles ») associés en série sur un guide coplanaire (Figure 2.40). Les procédés de fabrication de ce limiteur de puissance sont identiques à ceux décrits dans la partie précédente, à la différence près que les motifs de VO<sub>2</sub> sont mis en série avec des résistances en couches minces de carbone dopé au nickel, pour mieux contrôler la résistance globale de l'ensemble (motif de VO<sub>2</sub> + motif de C-dopé Ni).

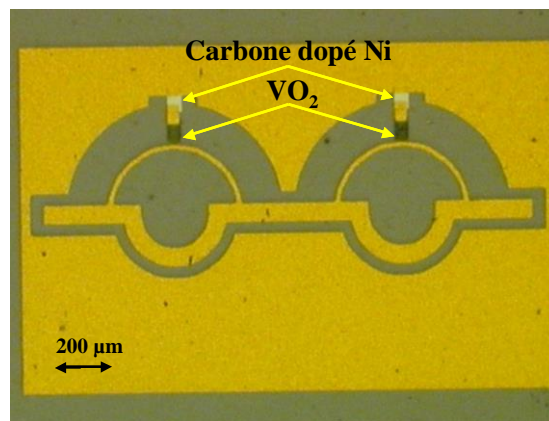


Figure 2.40. Image par microscopie optique d'un limiteur de puissance à deux « boucles » utilisant des motifs de carbone dopé et de VO<sub>2</sub> comme éléments actifs.

Ce dispositif est constitué d'une ligne de transmission centrale de 50  $\Omega$  et de deux « boucles » identiques ayant chacune deux branches d'impédance caractéristique 50  $\Omega$  et 100  $\Omega$  laissant passer

respectivement deux tiers et un tiers du signal RF incident. Dans chaque boucle, les branches d'impédance  $100\ \Omega$  (plus fines) sont reliées à la ligne de masse par des motifs en couche mince de  $\text{VO}_2$  en série avec des résistances de carbone dopé au nickel. L'ensemble de ces structures sont dimensionnées pour avoir une résistance globale de  $100\ \Omega$  quand le  $\text{VO}_2$  est à l'état métallique. Le fonctionnement du dispositif est alors le suivant :

- A température ambiante, le  $\text{VO}_2$  est à l'état semi-conducteur, il est très résistif ( $70600\ \Omega/\square$ ). Un signal RF de puissance inférieure au seuil d'activation du limiteur peut traverser le dispositif avec peu de pertes ( $<0.5\ \text{dB}$ ) (courbes 1 et 2 sur la Figure 2.41).
- Quand le motif de  $\text{VO}_2$  devient métallique ( $R(\text{VO}_2)=18\ \Omega/\square$ ) sous l'effet de la puissance incidente, la résistance globale, constituée des motifs de  $\text{VO}_2$  et du carbone dopé, est égale à  $100\ \Omega$ . Le signal RF passant dans la branche d'impédance  $100\ \Omega$  est court-circuité à la masse. Un tiers du signal est alors transmis par le dispositif, ce qui représente une atténuation de  $2\ \text{dB}$  par « boucle » (courbes 3 et 4 sur la Figure 2.41).

La résistance des couches de carbone dopé obtenue par PLD est légèrement plus élevée que la valeur escomptée, provoquant un écart entre les simulations et les mesures quand le  $\text{VO}_2$  est à l'état métallique. En effet, dans ce cas, la résistance globale est supérieure à  $100\ \Omega$  et donc le signal est moins atténué dans les « boucles ». Ce dispositif fonctionne également sur une large bande de fréquence (de  $100\ \text{MHz}$  à  $18\ \text{GHz}$ ).

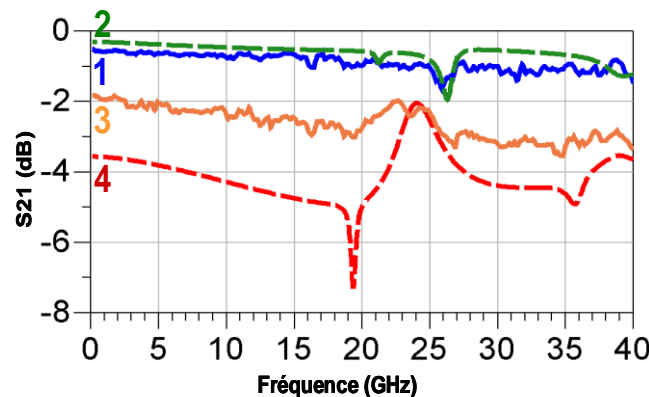


Figure 2.41. Simulations (lignes pointillées 2 et 4) et mesures (1 et 3) du coefficient de transmission  $S_{21}$  du limiteur de puissance quand le  $\text{VO}_2$  est isolant (courbes 1 et 2) et quand le  $\text{VO}_2$  est métallique (courbes 3 et 4).

La caractérisation du dispositif en fonction du niveau de puissance incidente (Figure 2.42) est réalisée dans les mêmes conditions que celles décrites précédemment.

Lorsque la puissance incidente croît, la puissance transmise augmente proportionnellement jusqu'à un seuil (point 1 de la Figure 2.42). Ce seuil correspond à l'activation de la première structure de  $\text{VO}_2$  court-circuitant ainsi une partie du signal à la masse et par conséquent, le niveau de la puissance transmise diminue légèrement. Si le niveau de la puissance incidente augmente encore, la puissance transmise continue d'augmenter linéairement jusqu'à un deuxième seuil (point 2 sur la Figure 2.42). Ce nouveau seuil correspond à l'activation de la seconde structure de  $\text{VO}_2$  (dans la deuxième « boucle ») court-circuitant une seconde partie du signal incident à la masse. L'activation des structures de  $\text{VO}_2$  est donc séquentielle, ce qui assure une limitation progressive de la puissance incidente. Plus intéressant, les valeurs de seuils de puissance peuvent être aisément contrôlées simplement en appliquant une tension DC entre la ligne centrale et la ligne de masse du guide CPW. **Le contrôle en tension DC peut donc contraindre le dispositif limiteur à un seuil spécifique, qui peut être choisi en fonction du niveau de limitation désiré.**

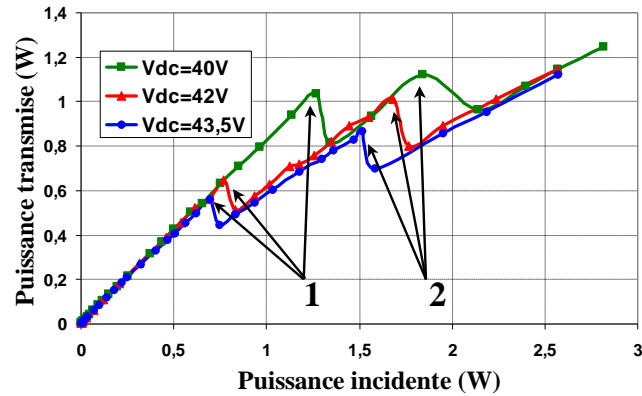


Figure 2.42. Mesure de la puissance transmise dans le limiteur en fonction de la puissance incidente à 10 GHz, sous différentes tensions DC imposées entre la ligne centrale et la ligne de masse du guide CPW.

Si la puissance incidente diminue, le motif de  $\text{VO}_2$  repasse à l'état semi-conducteur. Même si la limitation de puissance obtenue avec ce dispositif n'est pas parfaitement constante, les résultats sont encourageants et laissent penser qu'en rajoutant des « boucles », (ce qui augmenterait la plage de puissance pouvant être limitée) et en dimensionnant précisément les résistances de la partie active du circuit on obtiendrait un niveau quasi constant lors de la limitation de puissance. Plus de détails concernant ces dispositifs à plusieurs « boucles » sont présentés dans l'article à la fin de cette partie [53].

En conclusion, nous avons réalisé des dispositifs innovants pour la limitation de la puissance RF, en utilisant la transition isolant- métal (MIT) des films de  $\text{VO}_2$ . La plupart des limiteurs fabriqués fonctionnent sur des larges bandes de fréquences (plusieurs dizaines de GHz). Ils ont des seuils de puissance variables en fonction de l'impédance des motifs de  $\text{VO}_2$  utilisée (cas des limiteurs « disjoncteurs ») et en fonction des paramètres extérieurs, comme la température ou la tension appliquée. Ils peuvent être utilisés de manière passive ou de manière active. Les perspectives sur ce sujet de recherche concernent la mesure de **la tenue en puissance maximale des limiteurs et l'évaluation de leurs temps de réponse (mesures en cours réalisées en puissance pulsée [56])**, pour pouvoir les comparer aux technologies de limiteurs de puissance micro-ondes existantes. Nous travaillons actuellement, également sur la **réalisation d'un modèle thermique** qui permettrait d'évaluer la valeur de la puissance seuil des limiteurs en fonction des caractéristiques des motifs de  $\text{VO}_2$ .

# Microwave Power Limiting Devices Based on the Semiconductor-Metal Transition in Vanadium Dioxide Thin Films

Julien Givernaud, Aurelian Crunteanu, Jean-Cristophe Orlanges, Arnaud Pothier, Corinne Champeaux, Alain Catherinot, and Pierre Blondy, *Member IEEE*

**Abstract**—We present a novel concept of microwave power limiting devices based on reversible semiconductor-to-metal transition (SMT) of vanadium dioxide thin films integrated on coplanar waveguides (CPW). We designed, simulated and fabricated devices which can be reversibly driven from a low-loss ( $<0.7$  dB) transmission state into an attenuating state ( $> 20$  dB) as the  $\text{VO}_2$  material is changing from semiconductor to the metal state when the incident microwave power exceeds a threshold value. These devices are broadband and present a tunable threshold power value. They could be easily integrated as protection circuits from excess power in a large variety of microwave components.

**Index Terms**—Microwave limiters, semiconductor-metal transition, CPW waveguide, powers dividers and combiners, vanadium dioxide

## I. INTRODUCTION

THE ever-increasing demand of high RF/ microwave power capabilities in telecommunication and/ or tracking systems raised the need for high-performance protection devices which are able to limit the power densities or high-power transient signals incoming on low-power components of communication receiver front-ends (e.g. low-noise amplifiers that withstand no more than 20 dBm). The most common protection components for the RF/MW domain are semiconductor power limiter devices that are limiting the input power to a specific designed value and for a specific frequency domain [1]. The most widely used solid-state passive power limiters (PPL) are based on semiconductor components like PIN diodes or MESFET transistors or combinations of the two [2]. However, the rapid development of advanced RF/MW components and systems in terms of power and agility adds new demands for these control devices in terms of low power consumption, higher incident power control, high reliability etc. Alternative promising solutions

based on superconductor thin film integration in coplanar microwave waveguides have been already proposed [3], but these devices required supplementary cryogenic equipments.

Our approach for fabrication of high reliability/ high repeatability power limiter devices on a broadband frequency domain is based on the integration of vanadium dioxide ( $\text{VO}_2$ ) thin films in a coplanar waveguide transmission line. Vanadium dioxide is one of the most interesting and studied members of the vanadates family performing a semiconductor-metal phase transition (SMT) [4]. Thus, at room temperature (low temperature state)  $\text{VO}_2$  is a highly resistive semiconductor, with a band gap of  $\sim 1$  eV. At temperatures higher than  $68^\circ\text{C}$  (341 K) the  $\text{VO}_2$  undergoes an abrupt transformation to a metallic state (low resistive phase), which is reversible when lowering the temperature below  $65^\circ\text{C}$  (the material becomes again semiconductor) [4-7]. The phase transition is accompanied by a large modification of its electrical and optical properties: the electrical resistivity decreases by 3 to 5 orders of magnitude between the semiconductor and the metallic states while the reflectivity in the optical domain increases. The reversible SMT can be rapidly triggered by different external excitations: temperature, optically, electrically- by charge injection, and even pressure [4-6]. Recent studies showed that the optically- and electrically-induced transitions can be very fast (in the range of hundreds of femtoseconds) and that the transition is more typical of a rearrangement of the electrons in the solid (electron-electron correlations) than an atomic rearrangement (crystalline phase transition from semiconductor monoclinic to a metallic rutile structure) [4, 5]. The transition temperature of the  $\text{VO}_2$ 's SMT can be increased or decreased by doping with metals like W, Cr, Ta or Al [8].

$\text{VO}_2$  thin films have also a high voltage breakdown, which can be exploited for transmission of high power levels in microwave devices. We used this characteristic for designing simple RF/ MW passive power limiting components, which may be further developed as more complex devices.

## II. FABRICATION OF A POWER- INDUCE SWITCHING DEVICE

### A. Deposition of the $\text{VO}_2$ thin layers

$\text{VO}_2$  layers of almost 250 nm in thickness were deposited on 500  $\mu\text{m}$  thick C-type sapphire substrates by using the reactive pulsed laser deposition (PLD) technique. This technique employs the laser ablation (KrF excimer laser at 248

Manuscript received July 31, 2009. This work was supported by France's National Research Agency (ANR) through the research grant "Admos- $\text{VO}_2$ " no. ANR-07-JCJC-0047.

J. Givernaud, A. Crunteanu, J. C. Orlanges, A. Pothier, P. Blondy are with XLIM UMR 6172 University of Limoges/ CNRS, 123 avenue Albert Thomas 87060 Limoges, FRANCE (corresponding author: A. Crunteanu, tel: 00 33 555 45 7344, fax: 00 33 555 45 76 49, aurelian.crunteanu@xlim.fr, julien.givernaud@xlim.fr, orlianges@xlim.fr, arnaud.pothier@xlim.fr, and pierre.blondy@xlim.fr)

C. Champeaux and A. Catherinot are with SPCTS UMR 6638 -, University of Limoges/ CNRS, 123 avenue Albert Thomas 87060 Limoges, FRANCE (corinne.champeaux@unilim.fr and alain.catherinot@unilim.fr).

nm, 25 ns pulse radiation) of a pure vanadium target under oxygen atmosphere and the deposition of the ablated and reactive species on a nearby substrate. The typical deposition parameters for obtaining crystalline, oriented VO<sub>2</sub> layers are: laser fluency – 3.5 J/cm<sup>2</sup>, distance target-substrate ~50 mm, O<sub>2</sub> pressure during deposition -  $2.2 \times 10^{-2}$  mbar, temperature of the substrates – 500°C [7, 9, 10]. After deposition, the VO<sub>2</sub> layers were found to be crystalline by DRX characterisation (monoclinic structure), with low roughness (~10 nm rms). The VO<sub>2</sub> resistivity values were measured by 4-points resistivity measurements of the as-deposited layers as a function of temperature. Typical variation of the thin film resistivity,  $\rho$  with temperature (normalized to the resistivity at room temperature,  $\rho_0$ ) is presented in Figure 1.

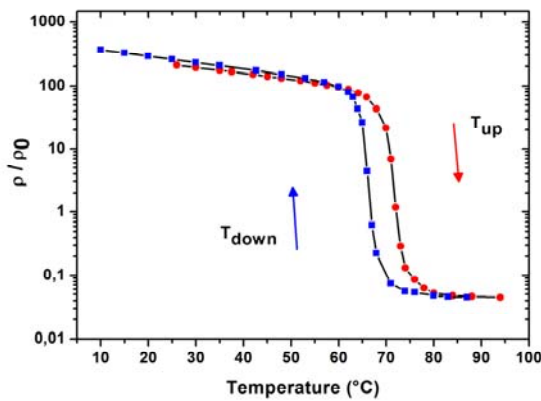


Fig. 1: Relative resistivity  $\rho / \rho_0$  vs temperature for a VO<sub>2</sub> layer

A typical hysteresis cycle of the resistivity is observed when the VO<sub>2</sub> thin film is heated forward and backward around its transition temperature (~70°C for the specific layer presented in Fig. 1) and one may notice a resistivity changes of around 3 orders of magnitude during the phase transition cycle.

#### B. Fabrication of a MW power induce switching device ("fuse"-type device)

An optical microscopy image of the switching power device is presented in Figure 2. As observed, it is based on a microwave coplanar waveguide (CPW) with a VO<sub>2</sub> thin film pattern, which fills the gap between the signal line and the grounds lines. The components were fabricated in a clean room environment using classical micro fabrication technology [10]. The as-deposited VO<sub>2</sub> layer was patterned using wet etching. It follows a thermal evaporation step of a Ti/Au seed layer and the electrolytic deposition of a 1.5-μm thick gold layer that is finally photolithographically patterned and wet- etched for defining the CPW transmission line (Fig. 2).

The operating principle of the component can be described as follows: at low incident microwave power levels and room temperature, the VO<sub>2</sub> is in its semi conducting state having a high resistivity and allows the signal to pass through the CPW line with almost no attenuation; when the power level of the incoming RF/ MW signal exceed a threshold value ( $P_{th}$ ), the

VO<sub>2</sub> layer performs the phase transition (mainly induced by MW heating [11,12]) and goes to its low-resistive, metallic state. The RF/ MW signal is thus shunted to the CPW ground and highly attenuated.

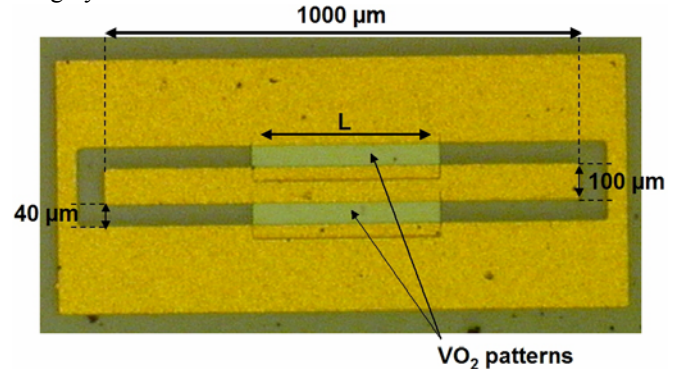


Fig. 2: Picture of a CPW waveguide loaded with VO<sub>2</sub> patterns

#### C. S- parameters and power characteristics measurements

Before testing the fabricated devices for their RF/MW power capabilities, we measured their S-parameters for two extreme temperatures (room temperature at 23 °C and heated at 100 °C) for estimating respectively the transmitted losses when the VO<sub>2</sub> is in the semiconductor state (at room temperature) and the isolation of the transmission lines when the VO<sub>2</sub> is in the metallic state (when heated). The measured S21 transmission parameters for a CPW loaded with VO<sub>2</sub> patterns of different lengths (100, 200 and 450 μm) are represented in Figure 3 at room temperature (VO<sub>2</sub> in semiconductor state) and in Figure 4 at 100°C (VO<sub>2</sub> in the metallic state).

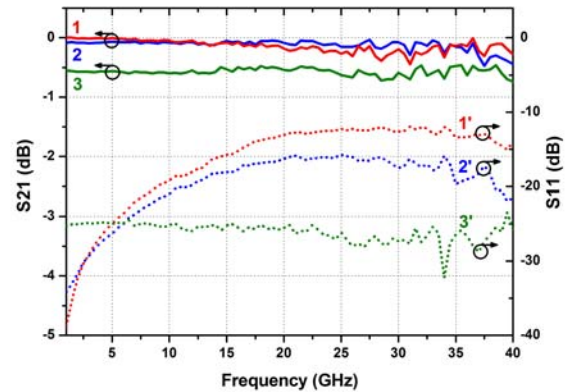


Fig. 3: Measurements of transmission parameter S21 at 23°C of a CPW waveguide loaded with different VO<sub>2</sub> patterns lengths (100 μm: curve 1, 200 μm: curve 2, 450 μm: curve 3) and reflection parameter S11 (100 μm: curve 1', 200 μm: curve 2', 450 μm: curve 3').

As observed in Figure 3, at room temperature, VO<sub>2</sub> is in a semi-conductor state with a high resistivity (about  $\rho = 0.01 \Omega.m$ ) allowing the RF signal to be transmitted through the CPW line with a very small attenuation from 100 MHz to 40 GHz (lower than 0.7 dB, depending on the VO<sub>2</sub> patterns length). The reflection parameters, S11, depend also on the



VO<sub>2</sub> pattern lengths; when VO<sub>2</sub> is in the semi conducting state S11 is lower than 10 dB (Figure 3).

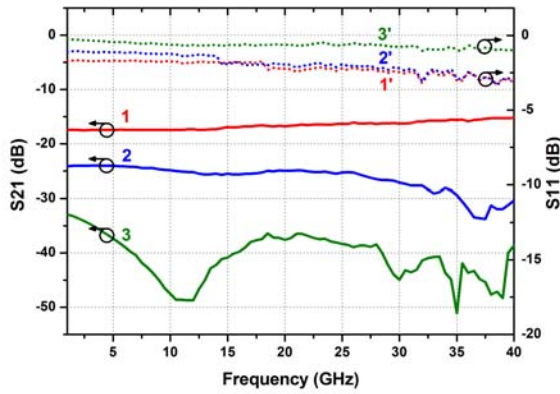


Fig. 4: Measurements of transmission parameter S21 at 100°C of a CPW waveguide loaded with different VO<sub>2</sub> patterns lengths (100 μm: curve 1, 200 μm: curve 2, 450 μm: curve 3) and reflection parameter S11 (100 μm: curve 1', 200 μm: curve 2', 450 μm: curve 3').

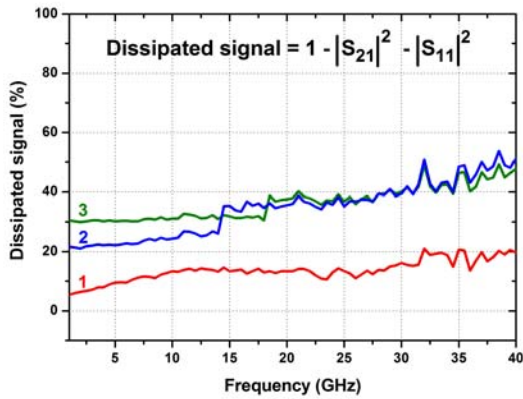


Fig. 5: Measurements of the dissipated signal when VO<sub>2</sub> is in the metallic state of a CPW loaded with different VO<sub>2</sub> patterns lengths (100 μm: curve 1, 200 μm: curve 2, 450 μm: curve 3).

When the temperature is increased to 100°C (Figure 4), the VO<sub>2</sub> passes in the metallic state and its resistivity decreases quickly to  $\rho = 9.5 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ . The incident RF signal is reflected backwards (attenuation higher than 32 dB from 100 MHz to 40 GHz) as indicated by the reflection parameters S11 values, which are higher than 4 dB (on Fig. 4). On Figure 5 is represented the part of the incident signal dissipated in a CPW line loaded with different VO<sub>2</sub> patterns lengths (dissipation expressed as  $(1 - |S_{21}|^2 - |S_{11}|^2)$ ) when the VO<sub>2</sub> is in the metallic state (dissipation curves associated with the S21 and S11 results on Fig. 4). The dissipation curves along with the S11 measurements show that the signal is both dissipated and reflected in the devices when the VO<sub>2</sub> patterns are in the metallic state.

The MW power characterisation of the devices, expressed as the characteristic transmitted power vs. incident power (CW microwave power at 10 GHz) ( $P_{out} = f(P_{in})$ ) was realised in a RF probe station with a controlled temperature, under dry N<sub>2</sub> atmosphere. A typical result is presented in Fig. 6, for a

CPW loaded with a 450-μm long VO<sub>2</sub> pattern.

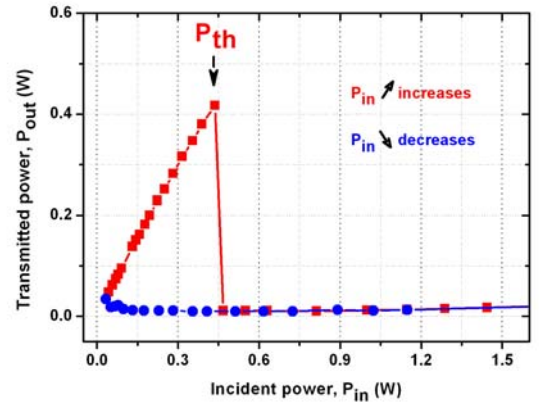


Fig. 6: Transmitted 10 GHz RF power as a function of the incident power through a CPW line “loaded” with a 450 μm length VO<sub>2</sub> film.

The incident RF power is transmitted through the CPW waveguide at low incident powers until a threshold value is reached ( $P_{th} \sim 0.5$  W in the presented case, the value depends on the VO<sub>2</sub> thin film pattern geometry). At  $P_{th}$ , through the combined action of the MW thermal dissipation/ microwave currents, the VO<sub>2</sub> transforms rapidly in a metallic state [7] and highly attenuates the incident signals with powers higher than this threshold value. The power-induced transition of the VO<sub>2</sub> layer can be easily visualised by optical microscopy in the reflective mode since there is a relatively high optical contrast between the metallic and the semi conducting states of the VO<sub>2</sub> thin film. Figure 7 presents optical microscopy images of a compound loaded with a 450-μm length VO<sub>2</sub> film pattern being exposed to two different levels of MW power. In the image on the Fig. 7a, the input power is inferior to the threshold power,  $P_{th}$ , the entire VO<sub>2</sub> pattern is still in its semiconducting state (VO<sub>2</sub>-S on the image) the output power level is quasi-equal to the incident power one. As the incident power become high than  $P_{th}$  (Fig. 7b), part of the VO<sub>2</sub> film is turn out to its metallic state (VO<sub>2</sub>-M on the Fig. 7b, darker colour as compared to the VO<sub>2</sub>-S part), the incident power is reflected (and partly dissipated) and the output power decrease to zero. The totality of the VO<sub>2</sub> pattern becomes metallic as the power is increased over a value of 1 W (for this specific device). For incident signal power levels as high as 5 W, the device is still operational. When the RF/ MW power value is decreased back at a sufficient low level (close to 0.05 W), the device is allowed to cool down and the VO<sub>2</sub> patterns turn again in a semiconductor state with its initial resistance value. This power induced VO<sub>2</sub> transition behaviour can be repeated indefinitely for a large number of cycles.

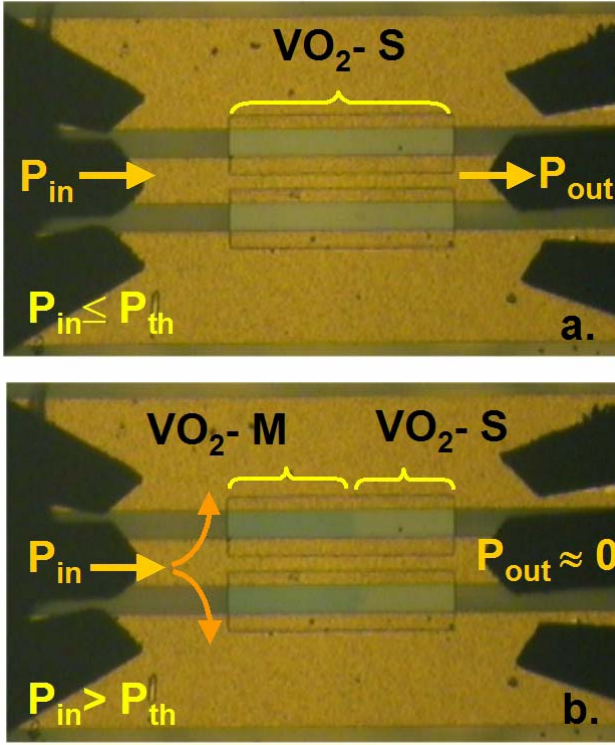


Fig. 7: Optical microscopy images of a CPW line loaded with a 450  $\mu\text{m}$  long  $\text{VO}_2$  film at low incident power,  $P_{\text{in}} < P_{\text{th}}$  (a) and  $\text{VO}_2$  pattern activation when the incident power is superior to the threshold level,  $P_{\text{in}} > P_{\text{th}}$  (b).

We have fabricated simple switching power devices with different  $\text{VO}_2$  patterns lengths of 50, 100, 200, 400, and 600  $\mu\text{m}$ . Since these  $\text{VO}_2$  patterns do not have the same electrical resistances (and thermal capacitances), the incident MW power value needed to switch the device to the metallic state of the  $\text{VO}_2$  is decreasing with increasing the  $\text{VO}_2$  pattern dimensions (Figure 8). One may adjust the power threshold value of such a device (between 0.25 up to 1.2 W) by simply modifying the dimensions (and thus, the overall resistance) of the  $\text{VO}_2$  pattern.

We determined also the impact of external parameters on the threshold power values of the fabricated devices (such as the temperature or a DC bias voltage applied across the  $\text{VO}_2$  patterns between the signal and the ground branches of the transmission line— since the SMT of such  $\text{VO}_2$  patterns can be electrically triggered as shown in Refs. [7] and [9]).

It may be seen that the incident MW power needed for triggering the SMT in a  $\text{VO}_2$  film is lower when increasing the external temperature applied to the device (Figure 9) or the DC voltage bias across the  $\text{VO}_2$  patterns (Figure 10). Thus, one may tune the threshold power value of these devices by changing the environment temperature or, in an easier way, the DC bias voltage across the  $\text{VO}_2$  patterns.

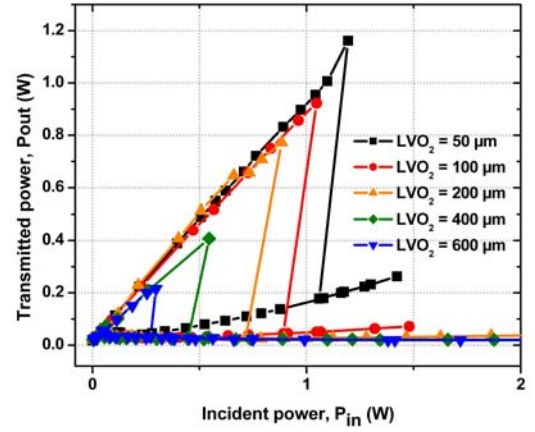


Fig. 8: Transmitted 10 GHz MW power as a function of the incident power through different CPW lines charged with  $\text{VO}_2$  patterns of different length.

The devices can be used in a passive way by sizing the  $\text{VO}_2$  pattern dimensions for obtaining the desired threshold power values (as shown in Figure 8), or in an active way, by applying a DC bias voltage or temperature on the  $\text{VO}_2$  patterns to fine tune the threshold values (Figures 9 and 10).

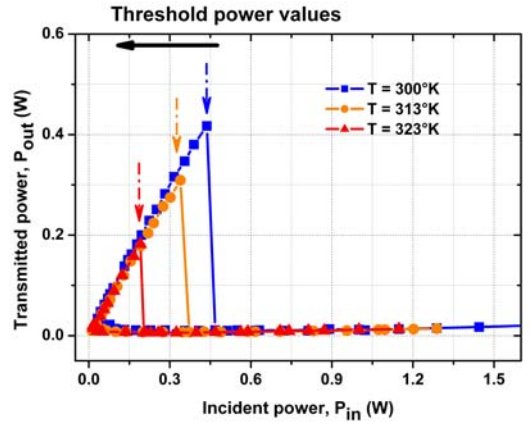


Fig. 9: Transmitted 10 GHz RF power vs the incident power through a CPW line “loaded” with a 100  $\mu\text{m}$  length  $\text{VO}_2$  patterns for 3 different external temperatures (300 K, 313 K and 323 K).

In the light of the results presented so far, the  $\text{VO}_2$ - based devices can be described as reconfigurable RF/ MW power – induce switching devices (or simply, RF/ MW “power fuses”) on a broadband frequency domain (100 MHz to 40 GHz as measured by us but with, potentially, the same characteristics for even higher frequencies, up to the THz domain)[7].

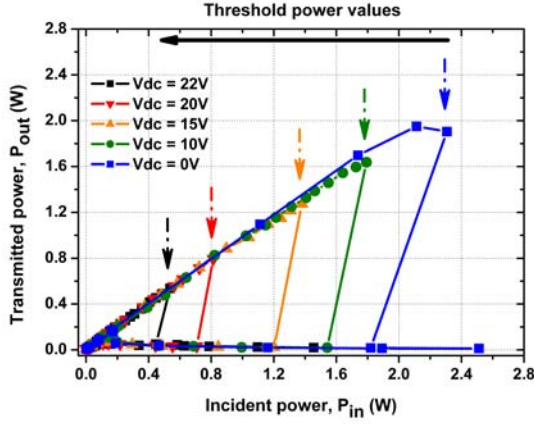


Fig. 10: Transmitted 10 GHz RF power vs. the incident power through a CPW line “loaded” with a 400- $\mu$ m length VO<sub>2</sub> pattern for 4 different DC bias voltages 10, 15, 20 and 22 V.

#### D. Identical distributed VO<sub>2</sub> patterns on CPW waveguide

In order to realize a real power limiter device (i.e. to obtain a relatively constant level of the transmitted power after reaching a threshold power value), we investigated a new design, based on a CPW line loaded with several distributed VO<sub>2</sub> patterns. We may expect that the incident MW power will be unevenly reflected/ dissipated in the distributed patterns and that a certain fraction of the incident power will be still transmitted after each of the sequentially- activated patterns. A first approach to fabricate a solid-state passive power limiter (PPL), which can limit the transmitted power level at a constant value, is illustrated in Figure 11.

As observed in Figure 12, when the incident power  $P_{in}$  increases, the transmitted power  $P_{out}$  increases also, until reaching a first threshold power value (at 0.35 W) corresponding to the first VO<sub>2</sub>-distributed pattern, which pass to the metallic state (the incident RF power is partly reflected afterwards and the level of the transmitted power decreases). By further increasing the incident power from 0.35 to 0.6 W, the transmitted power also increases until the incoming power becomes sufficiently high to switch on the second VO<sub>2</sub> pattern to its the metallic state. The transmitted power drops off again and so on for the rest of the VO<sub>2</sub> patterns. It may be noticed that the incident MW signal is not completely attenuated by the sequential actuation in the metallic state of the VO<sub>2</sub> patterns. In such a configuration, the VO<sub>2</sub> patterns with smaller dimensions (hence, higher resistances) will allow to pass some fraction of the incident signal along the transmission line. They act like small attenuators distributed along the CPW line.

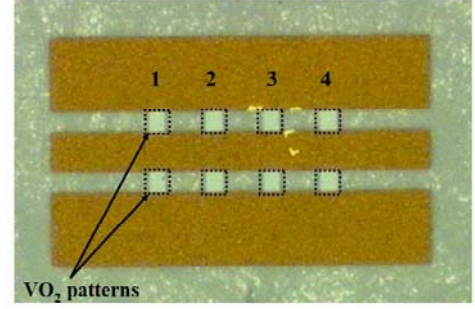


Fig. 11: Optical microscopy image of a switching power device based on a CPW line “loaded” with 4 VO<sub>2</sub> patterns of 40 $\mu$ m in length.

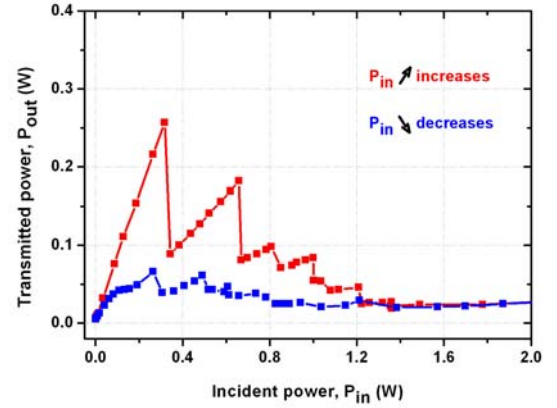


Fig. 12: Measurement of transmitted vs. incident MW power (at 10 GHz) of a 4 patterns-type VO<sub>2</sub> switching power device.

Although the transmitted power level is not constant as for an ideal power limiter, the design can be improved by combining VO<sub>2</sub> patterns having different lengths (and thus, different incident power attenuation capabilities).

Yet, an improved approach for realizing a true VO<sub>2</sub>-based MW power limiter device is presented in the next section. It is based on a transmission line design including power dividers and combiners.

### III. FABRICATION AND MEASUREMENT OF VO<sub>2</sub>-BASED POWER LIMITERS INCLUDING POWER DIVIDERS AND COMBINERS

The main idea of this new design methodology approach is that one of the two branches of a divider implemented on a CPW line will be connected to the ground line of the CPW by a VO<sub>2</sub>-based thin film pattern. The incident power will travel through the two branches of the divider and the two parts will be combined at the end of the CPW line. When the VO<sub>2</sub> pattern of the loaded branch will be actuated, the power traveling in this part of the divider will be reflected/ dissipated while the other branch of the divider will transmit its power. This will results in transmitted power attenuation at the exit part of the CPW line. The transmitted power level depends on the number of dividers/ combiners and on the impedance ratio,  $r_1$  and  $r_2$ , of the two branches of the dividers, ratios that can be simply expressed as:

$$r_{1,2} = 1 - \frac{Z_{1,2}}{Z_1 + Z_2}, \quad (1)$$



where  $Z_{1,2}$  are the characteristic impedances of the two branches of the divider, respectively. The equivalent circuit of the proposed device is presented in Figure 13.

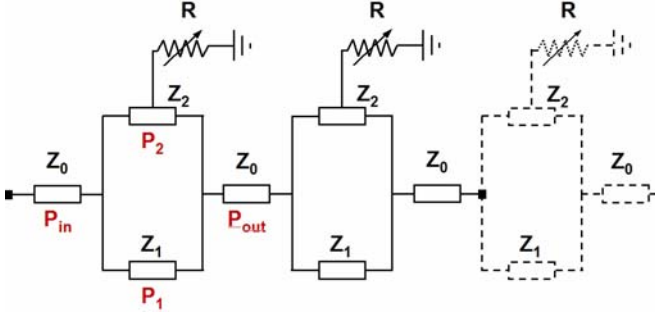


Fig. 13: Equivalent circuit of a N-times dividers/ combiners based power limiters.  $Z_0$  is the impedance of the main CPW transmission line,  $Z_1$  is the impedance of a first branch,  $Z_2$  is the impedance of the second branch, and  $R$  is the resistance of the active part of the device.

In this equivalent circuit,  $R$  is the resistance of the active part of the device composed of the  $\text{VO}_2$  resistance in series with a nickel-doped carbon thin film resistance,  $R = R_{\text{VO}_2} + R_{\text{Ni-C}}$ .  $P_{\text{in}}$  is the incident power applied at the input of the device,  $P_{\text{out}}$  the output power,  $P_1$  and  $P_2$  the powers in the  $Z_1$  and  $Z_2$  impedance branches, respectively.

As briefly described above, the working principle of the device considering only one divider/ combiner ring and by neglecting the transmission losses, is as follows:

-When  $R = R_{\text{VO}_2-S} + R_{\text{Ni-C}} \gg Z_2$  ( $\text{VO}_2$  highly resistive, in semiconducting state), the signal passes through the two branches with low losses,  $P_{\text{out}} \approx P_{\text{in}}$ .

-When  $\text{VO}_2$  transforms to the metallic state,  $R' = R_{\text{VO}_2-M} + R_{\text{Ni-C}}$  will match the characteristic impedance of the active branch ( $R' = Z_2$ ), the power in the  $Z_2$  impedance branch,  $P_2$ , is reflected (part of the signal may be dissipated in the resistance  $R'$ ). The only signal coming out from the divider/ combiner ring is the signal in the  $Z_1$  characteristic impedance branch, with a value of  $P_{\text{out}} = P_1 = r_1 \times P_{\text{in}}$ . The output power of the device is thus limited with a ratio of  $r_1$ . If the value of  $R$  would be much more lower than the characteristic impedance  $Z_2$  ( $R \ll Z_2$ ), the incoming signal  $P_{\text{in}}$  would be completely reflected and  $P_{\text{out}} = 0$ .

We designed the  $\text{VO}_2$ -based power limiter devices based on dividers/ combiners rings using ADS Momentum simulator by following the methodology presented in Refs. [13] for different models of ring couplers. Our design does not take into account the phase shifting of the signal in the devices [13] since we are not interested by this characteristic in our study. The ADS-Momentum simulations show that the use of ground bridges in these CPW impedance transformer rings (for an uniform ground plane) does not significantly modify their S-parameters responses. For keeping the fabrication process as simple as possible we decided to avoid the use of such structures.

An example of a fabricated device is presented in Figure 14.

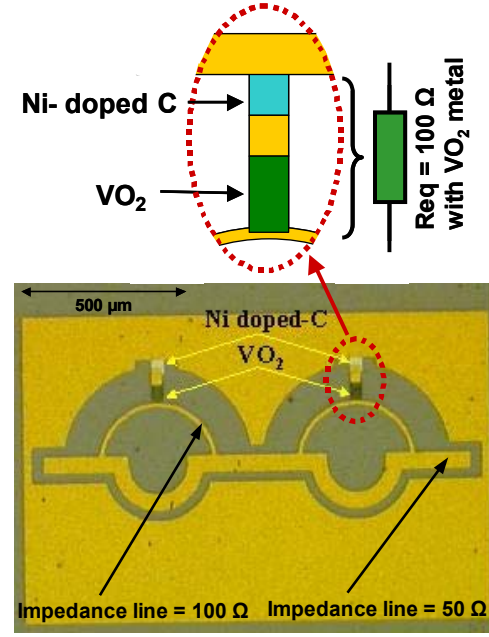


Fig. 14: Microphotograph of a 2-dividers/ combiners based power limiters using two identical distributed  $\text{VO}_2$  and Ni-doped carbon patterns forming the active part of the device.

The device presented in Fig. 14 (fabricated in a similar manner as described above for the power-induce switching devices) is composed of a  $50 \Omega$  central linear transmission line and 2 rings (divider/ combiner components). Each signal-dividing component has a  $100 \Omega$  characteristic impedance branch ( $Z_2$ , with a smaller line width) and a  $50 \Omega$  characteristic impedance branch ( $Z_1$ , with a larger line width). The impedance difference of the two branches makes the incident power to be divided in each ring with the ratio  $r_2 = 1/3$  (in the  $100 \Omega$  branches) and  $r_1 = 2/3$  in the  $50 \Omega$  branches. The  $100 \Omega$  branches of each of the rings are connected to the ground plane using a  $\text{VO}_2$  pattern in series with an additional Ni-doped carbon pattern (acting as a series resistance and added in order to match as accurate as possible an equivalent resistance ( $R_{\text{VO}_2-M} + R_{\text{Ni-C}}$ ), similar with the line impedance, of  $100 \Omega$ ).

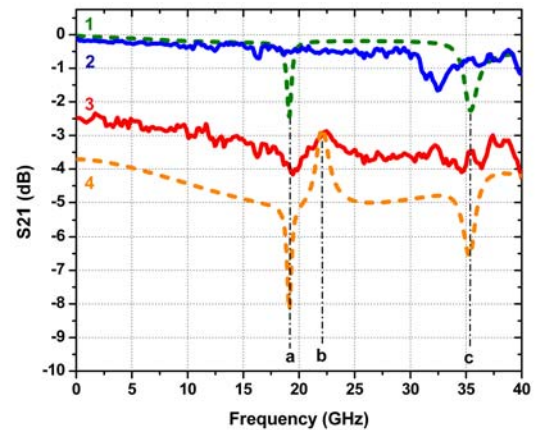


Fig. 15: Simulated (dashed curves 1 and 4) and measurements (full-line)

curves 2 and 3) of transmission parameters of the power limiter when the VO<sub>2</sub> is in a semi-conductor state (curves 1 and 2) and in the metallic state (curves 3 and 4).

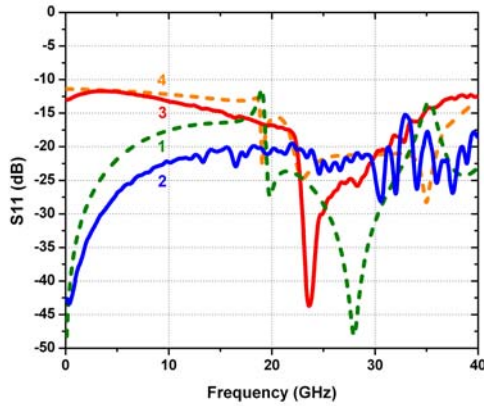


Fig. 16: Simulated (curves 1 and 4) and measurements (curves 2 and 3) of the S11 reflection parameters of the power limiter in Fig. 13, when the VO<sub>2</sub> is in the semi-conductor state (curves 1 and 2) and in the metallic state (curves 3 and 4).

At low incident power  $R \gg Z_2$ , the VO<sub>2</sub> pattern is in semi-conducting state and highly resistive (70600  $\Omega$ /square), the RF signal is transmitted with small attenuation through the 2 rings (Fig. 15 curve 1- measurements and curve 2- simulations). At incident powers higher than a threshold value the VO<sub>2</sub> pass in the metallic state and  $R' = R_{VO_2-M} + R_{Ni-C} \approx R_2$ . The resistance of the VO<sub>2</sub> pattern in its metallic form ( $R_{VO_2-M}$ ) plus the resistance of the Ni- doped carbon pattern ( $R_{Ni-C}$ ) are designed to match the value of 100  $\Omega$ , the same impedance as the thinnest branch of the rings. Thus, one third of the incident signal is attenuated by each ring (2 dB attenuation/ ring) as indicated in Fig. 15- curve 3 (measurements) and curve 4 (simulations). The small differences between the simulations and measurement results when the VO<sub>2</sub> is in the metallic state are due to the Ni-doped C resistances, which are slightly more resistive than designed and induced an impedance mismatch with the 100  $\Omega$  branches. Indeed, not enough power is attenuated, the measurements showing an attenuation of only 3 dB.

On the graphs in Figure 16, we can see that the device presents a quite good adaptation when the VO<sub>2</sub> is in the metallic state, with reflections lower than 12 dB on a wide frequency band. The optimization of the design (lines widths, rings dimensions, their position, etc.) has been done for minimizing as much as possible the reflections (S11 parameter) in the most critical case, when the VO<sub>2</sub> is in the metallic state. When the VO<sub>2</sub> is in the semi-conductor state, the reflections are lower than 15 dB. The resonance peak noted as “a” on the graphs in Fig. 15 comes from the resonance of the inter-ring line while the peaks noted as “b” and “c” comes from the resonance of the rings itself. The diameter of the rings and the inter-ring lines dimensions have been chosen in order to shift away these resonance peaks towards frequencies higher than 19 GHz while preserving device compactness. The characterization under incident

power of the fabricated broadband power limiter device is presented in Figure 17.

As observed on the figure, at low incident power signals, when the power increases (the red curve), the transmitted power increases proportionately until a threshold value (point 1 on Fig. 17). This threshold corresponds to a first VO<sub>2</sub> pattern actuation in the first ring, attenuating a part of the incident signal. The VO<sub>2</sub> patterns actuation behavior is the same as the one described in the previous section (switching power device). By further increasing the incident power, the transmitted power increases proportionately again until reaching a second threshold power value (point 2 on Fig. 17). This second threshold point corresponds to the VO<sub>2</sub> pattern actuation in the second ring that attenuates a part of the incident signal. When decreasing the incident power, the VO<sub>2</sub> patterns become again a semi-conducting (the blue curve on Fig. 17).

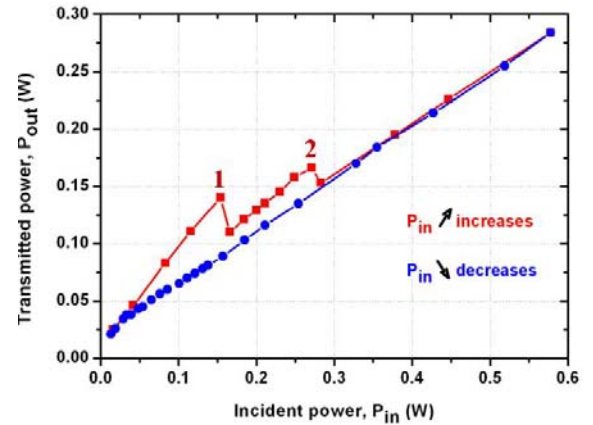


Fig. 17: Measurements of the transmitted power versus the incident power (at 10 GHz) for a 2-dividers/ combiners- based power limiter (at 340°K).

The VO<sub>2</sub> patterns actuation is sequential, insuring, as expected, a progressive limitation of the incident power. We must notice that these measurements were made at 340K (“temperature bias” to the device) for ensuring low thresholds power values to the VO<sub>2</sub> patterns. Indeed, our RF/ MW power cycling set-up is limited to 5 W maximum, which do not allow reaching the level of MW power required to switch on the VO<sub>2</sub> patterns in the metallic state at room temperature. Nevertheless this can be circumvented by properly adjusting the device geometry (splitting ratios of the signal in the dividers), by adjusting the material properties or by simply applying a DC bias voltage across the patterns.

Indeed, as previously shown for the switching power devices, different DC bias voltages applied across the VO<sub>2</sub> patterns allows to tune the characteristic of the device under cycled incident power (Figure 18). The measurements depicted in Figure 18 are realized by applying a DC bias voltage between the central line and the ground line of the device. The incident power required switching the VO<sub>2</sub> patterns to the metallic state decreases when the DC bias voltage increases. Setting a DC bias voltage between the central line and the ground of the CPW waveguide can trigger a specific threshold power value for the device.



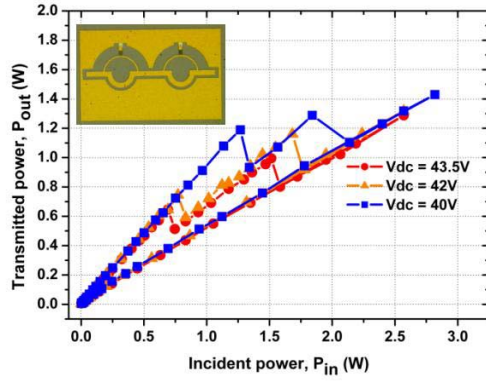


Fig. 18: Measurements of the transmitted power versus the incident power (at 10 GHz) for a 2-dividers based power limiter at different DC bias voltages (40 V, 42 V and 43.5 V), at room temperature.

The power limitation obtained with this device is not perfectly constant but we would expect that by increasing the number of the rings and by resizing precisely the resistance of the active part of the device in order to optimize the sequential activation of the  $\text{VO}_2$  patterns, we should achieve a quasi-constant transmitted power level.

As an example, for a similar fabricated device based on a 3-dividers/ combiners with a split ratio of 50/ 50 (2 equal impedances branches of  $70.7 \Omega$  per loop) integrated in series on a CPW line (Figure 19), the transmitted power is highly limited at almost constant values on a more extensive power range (Figure 22). The simulated and measured transmission ( $S_{21}$ ) and respectively, the reflection ( $S_{11}$ ) parameters are presented on the graphs in Figure 20 and Figure 21, respectively.

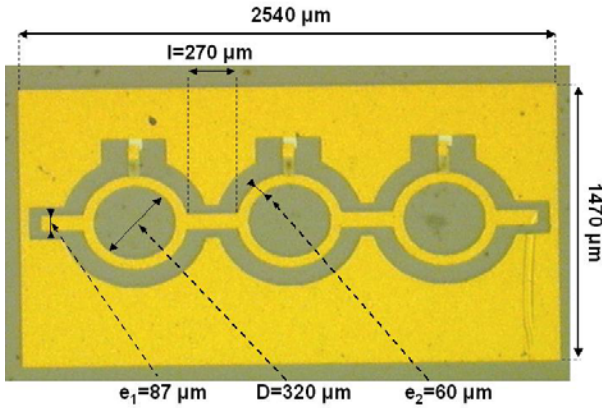


Fig. 19: Optical microscopy image of a 3-dividers/ combiners based power limiters using three identical distributed  $\text{VO}_2$  and Ni-doped carbon patterns forming the active part of the device.

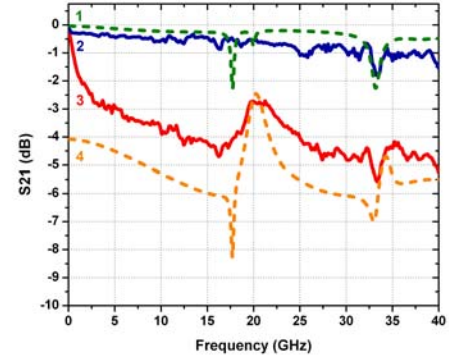


Fig. 20: Simulated (dashed curves 1 and 4) and measurements (full-line curves 2 and 3) of  $S_{21}$  transmission parameters of the power limiter presented in Fig. 18, when the  $\text{VO}_2$  is in a semi-conductor state (curves 1 and 2) and in the metallic state (curves 3 and 4).

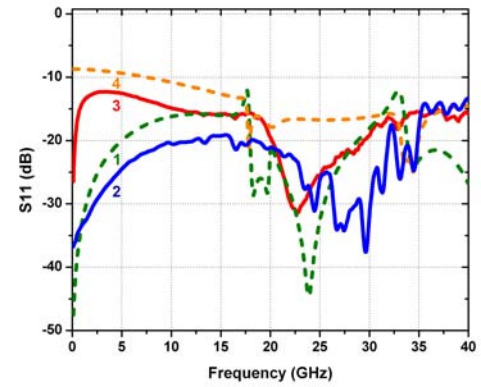


Fig. 21: Simulated (curves 1 and 4) and measurements (curves 2 and 3) of the reflection  $S_{11}$  parameters for the 3-rings type power limiter when the  $\text{VO}_2$  is in the semi-conductor state (curves 1 and 2) and in the metallic state (curves 3 and 4).

From the graphs in Figure 21 we may notice a calculated decrease of almost 25% in the slope of the  $P_{out}/ P_{in}$  characteristics after every  $\text{VO}_2$  patterns actuation (lines 1, 2 and 3, respectively on Figure 22). In principle, by adding another 7 identical rings to the device will allow to reach a quasi-constant output power (line 10 in Figure 22) for a wide working device power range.

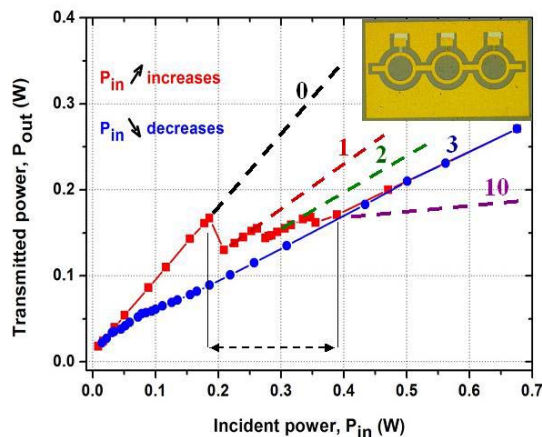


Fig. 22: Measurements of the transmitted power versus the incident power (at 10 GHz) for a 3-dividers based power limiter device (shown in the insert) at 340°K.

In practice, the design of such VO<sub>2</sub>-based power limiters will depend on a specific demand but the large possibilities of the design variables (number of combiners/ dividers, their split ratios, the material characteristics, the device tuning capabilities etc.) allow considering such devices for a broad area of applications. Work is ongoing for assessing the time response of these types of devices (by applying pulsed MW power) as well as their reliability (maximum number of cycles under different levels of power, different bias etc.).

#### IV. CONCLUSION

We have designed and fabricated new passive RF/ MW power limiters (PPL) based on semi-conductor to metal transition in vanadium dioxide thin films on CPW transmission lines. Firstly, we proposed a simple design composed of a CPW line loaded with VO<sub>2</sub> patterns, which fill the gap between the signal line and the grounds lines of the CPW. This power-induced switching device behaves like a microwave “fuse” on a very broad frequency band, from 100 MHz to 40 GHz. It can be used either in a passive or in an active way, by changing external parameters like temperature or by applying a DC bias voltage across the VO<sub>2</sub> pattern to modify the threshold power values. We proposed also a more complex device based on a CPW line on which are implemented power dividers/ combiners associated with VO<sub>2</sub> and Ni- doped carbon patterns. These simple PPL devices can limit the RF/ MW incident power on a large band of frequency and could be easily implemented as broadband protection devices from excess power in different types of microwave circuitry.

#### REFERENCES

- [1] R.F.Bilotta, "Receiver Protections: A Technology Update", Microwave Journal, v.40, no.8, pp. 90-96, August 1997.
- [2] A. Phommahaxay, G. Lissorgues, L. Rousseau, T. Bourouina and P. Nicole, "Towards a Frequency-Selective Microwave Power Limiter for Defense and Aerospace Applications", Proceedings of the 4th European Radar Conference EuMA, Munich, Germany, pp. 335- 338, October 2007

- [3] J. C. Booth, K. Leong and S. A. Schima, "A superconducting microwave power limiter for high-performance receiver protection," IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., pp. 139-142, June 2004.
- [4] F. Morin, "Oxide which shows a metal-to-insulator transition at the high temperature", *Phys. Rev. Lett.* **3**, 34 (1959).
- [5] G. Stefanovich, A. Pergament and D. Stefanovich "Electrical switching and Mott transition in VO<sub>2</sub>", *J. Phys.: Condens. Matter*, Vol. 12, pp. 8837-8845, 2000.
- [6] A. Cavalleri, et al, "Femtosecond Structural Dynamics in VO<sub>2</sub> during an Ultrafast Solid-Solid Phase Transition", *Physical Review Letters*, 87(23) 237401-1 - 237401-4, 2001.
- [7] F. Dumas-Bouchiat, C. Champeaux, A. Catherinot, A. Crunteanu and P. Blondy, "RF-microwave switches based on reversible semiconductor-metal transition of VO<sub>2</sub> thin films synthesized by pulsed-laser deposition", *Appl. Phys. Lett.* **91**, pp. 223505-1-3, 2007.
- [8] I. Kitahiro and A. Watanabe, "Shift of transition temperature of vanadium dioxide crystals", *Jpn. J. Appl. Phys.* **6** (1967) 1023-1024.
- [9] J. Givernaud, C. Champeaux, A. Catherinot, A. Pothier, P. Blondy, and A. Crunteanu, "Tunable band stop filters based on metal insulator transition in vanadium dioxide thin films", *IEEE International Microwave Symposium 2008*, WEP1D-02, Atlanta, GA, USA, 15-20 June 2008.
- [10] J. Givernaud, C. Champeaux, A. Catherinot, A. Pothier, P. Blondy, and A. Crunteanu, "CPW self-resetting power limiting devices based on microwave power induced semiconductor-metal transition in vanadium dioxide", *IEEE International Microwave Symposium 2009* TUE2-5, Boston, MA, 6-12 June 2009.
- [11] J.Geist, J. J. Shah, M. V. Rao and M. Gaitan,"Microwave power absorption in low-reflectance, complex, lossy transmission lines", *J. Res. Natl. Stand. Technol.*, vol 112, pp177-189, August 2007.
- [12] J. J. Shah, S. G. Sundaresan, J. Geist, D. R. Reyes, J. C. Booth, M. V. Rao, and M. Gaitan "Microwave dielectric heating of fluids in an integrated microfluidic device", *J.Micromech. Microeng.*, vol. 17, pp. 2224-2230, October 2007.
- [13] C.-H. Ho, L. Fan, and K. Changb "New uniplanar coplanar waveguide hybrid-ring couplers and magic-T's", *IEEE Transactions on microwave theory and tech.*, vol. 42, NO. 12, december 1994.
- [14] G. Ponchak and J. Papapolymerou, "180 Degree Hybrid (Rat Race) Junction on CMOS Grade Silicon with a Polyimide Interface Layer," *IEEE Topical Meeting on Si Monolithic Integrated Circuits in RF systems Digest*, pp. 96-99, Germany, April 2003.



**Julien Givernaud** received the Bachelor degree in material science from the Engineering National School of Limoges (ENSIL), France, in 2006, and he is currently working for obtaining his Ph.D at the University of Limoges. Since 2007, he is with the XLIM Research Institute, CNRS/ University of Limoges. His research interests include the integration of smart materials (mainly VO<sub>2</sub>) in RF-microwave devices.



**Aurelian Crunteanu** received the Phys. Eng. degree in optics and optical technologies, Master's degree, and Ph.D. degree in physics from the university of Bucharest, Bucharest, Romania, in 1995, 1996, and 2000, respectively, and the Ph.D. degree in material sciences from the Claude Bernard University, Lyon 1, France, in 2001. From 2001 to 2003, as a Post-Doctoral Fellow with the Institute of Imaging and Applied Optics, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland, his research was oriented on the fabrication and characterization of microstructures and nanostructures in laser host materials, and laser-assisted thin-film deposition. Since 2003, he is a Researcher with the Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), XLIM Research Institute, University of Limoges, Limoges, France. His current research activities are focused on the development of new materials for microelectronics and optics, RF-MEMS reliability, and optical switching using MEMS technology.



**Jean-Christophe Orlianges** received the Ph.D. degree in material sciences from the University of Limoges, Limoges, France, in 2003. From 2008 to 2009, he was with the "Centre National de la Recherche Scientifique" (CNRS), as a Research Engineer with XLIM Laboratory. He is currently an Assistant Professor with the Faculty of Science, University of Limoges. He conducts research with the « Sciences des Procédés Céramiques et de Traitements de Surface » (SPCTS) Laboratory, Unité Mixte de Recherche (UMR) 6638, CNRS / University of Limoges.

His main research interests are pulsed-laser thin-films deposition techniques, nanostructured materials, development and integration of new materials in electronic and optic devices.



**Arnaud Pothier** received the Ph.D. degree in electrical engineering from the University of Limoges, Limoges, France in 2003. He is currently a full-time researcher with the Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), XLIM, University of Limoges. His current research activity is focused on tunable functions developments and implementation for analog communication modules using RF-MEMS components, like filters and phase shifters.



**Corinne Champeaux** received the Ph.D. degree in electrical engineering from the University of Limoges, Limoges, France, in 1992. Since 1992, she has been an Assistant Professor with the Faculty of Science, University of Limoges. She currently conducts research with the Sciences des Procédés Céramiques et de Traitements de Surface (SPCTS) Laboratory, Unité Mixte de Recherche (UMR) 6638, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), University of Limoges. Her main research

interests are laser-matter interactions and pulsed-laser thin-films deposition techniques. She is involved with the development and fabrication of MEMS components through the elaboration of new materials and fabrication processes.



**Alain Catherinot** received the Doctorate degree in physical sciences from the University of Orléans, France, in 1980. He is currently a Professor with the Process and Material Sciences Department, University of Limoges, France, where he conducts research on PLD techniques with the Sciences des Procédés Céramiques et de Traitements de Surface (SPCTS) Laboratory, (UMR), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). His research

interests include plasma and laser materials interactions, PLD of thin films and nanostructured materials, and their characterizations. He is also involved in MEMS fabrication using innovative deposition methods and materials.



**Pierre Blondy** (M'00) received the Ph.D. and Habilitation degrees from the University of Limoges, Limoges, France, in 1998 and 2003 respectively. From 1998 to 2006, he was with the Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), as a Research Engineer with XLIM Laboratory, where he began research on RF-MEMS technology and applications to microwave circuits. He is currently a Professor at the University of Limoges, leading a research group on RF-MEMS. He was a visiting researcher at the

University of Michigan, Ann Arbor, USA in 1997 and at the University of California at San Diego, La Jolla, USA in 2006 and 2008. Dr. Blondy was an Associate Editor for the IEEE MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS in 2006. He is a member of the IEEE International Microwave Conference Technical Program Committee since 2003.

## 2.6. METAMATERIAUX ACCORDABLES ELECTRIQUEMENT DANS LE DOMAINE TERAHERTZ [57]

Lors de la caractérisation des propriétés électriques et optiques de la transition isolant métal du dioxyde de vanadium (section 2.1), nous avons montré son caractère large bande. En effet, dans le domaine de fréquences THz, les caractéristiques électriques/ optiques du VO<sub>2</sub> subissent des modifications abruptes lors du passage d'un état isolant à un état métallique. Ce phénomène a donc été exploité pour réaliser des **composants hybrides type métamatériaux accordables**. L'intégration de films minces de dioxyde de vanadium permet de disposer d'un **élément agile qui permettra de rendre accordable ou moduler en fréquence leurs réponses** par des stimuli thermiques mais également électriques, avec des temps de réponses faibles.

*Notons que cette étude est financée partiellement par la Fondation EADS dans le cadre du projet « Métamatériaux dans le domaine THz basés sur la réponse non-linéaire des matériaux à transition de phase » (2011-2013, en collaboration avec le laboratoire SPCTS et le département Photonique d'XLIM (G. Humbert)).*

**Les métamatériaux** ou les matériaux artificiels sont des structures conçues en réalisant un agencement périodique de résonateurs métalliques de dimensions très inférieures à la longueur d'onde dans la bande de fréquences de fonctionnement. Cet arrangement 2D ou 3D génère de nouvelles propriétés électromagnétiques (indice de réfraction, permittivité ou perméabilité négatives, effets mémoire) permettant de réaliser des fonctions originales dans des domaines de fréquences où les matériaux classiques ne peuvent pas être utilisés (modulation, filtrage, système d'imagerie à haute résolution) [58] **notamment aux fréquences térahertz** (THz) [59]. Du fait de son grand potentiel d'utilisation dans les domaines de l'imagerie ou des télécommunications courte portée, cette gamme de fréquences fait, actuellement, l'objet de nombreuses recherches [58, 59]. Actuellement, les recherches s'orientent vers le développement de structures avec des réponses actives et contrôlables par l'intermédiaire de stimuli externes, pour pouvoir manipuler ces ondes (modulation, filtrage, polarisation) et développer des systèmes fonctionnant dans cette gamme de fréquences.

Dans ce contexte, nos recherches visent **l'étude et la réalisation de dispositifs à base de métamatériaux permettant le contrôle dynamique de la propagation des ondes THz pour la réalisation de fonctions spécifiques comme la commutation et la modulation du signal incident ou le filtrage accordable**. La modification de l'interaction des dispositifs avec le champ électromagnétique (espace libre) est assurée par l'introduction dans la structure des métamatériaux d'éléments à propriétés variables, à savoir des matériaux à transition de phase (e.g. dioxyde de vanadium, VO<sub>2</sub>). Dans notre approche, le contrôle en temps réel du champ électromagnétique est réalisé en modifiant les propriétés électriques individuelles des résonateurs. Concrètement, nous avons conçu et réalisé plusieurs types des structures (Figure 2.43) sous la forme de matrices périodiques de résonateurs métalliques (fils coupés, résonateurs type SRR-split rings resonators) déposées simplement sur une couche mince de VO<sub>2</sub> ou encore, ou intégrant eux-mêmes des motifs discrets de VO<sub>2</sub>. Dans ce dernier cas, la réponse fréquentielle globale de la structure hybride est modifiée lors de la transition MIT du VO<sub>2</sub> activée de manière thermique et électrique.



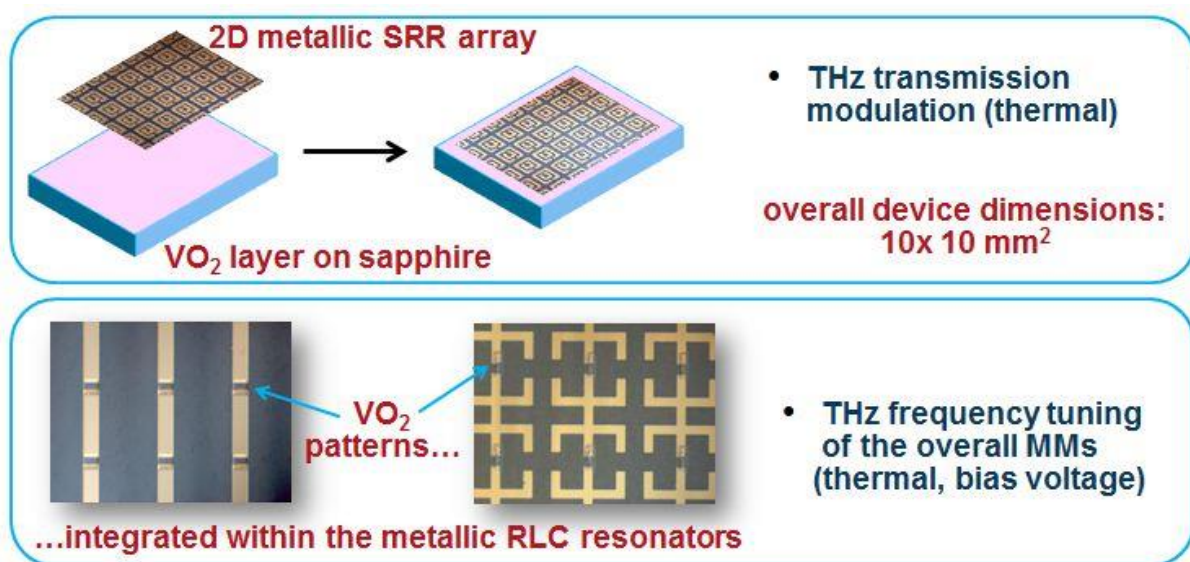


Figure 2.43. Design des métamatériaux hybrides accordables par l'intégration des matériaux à transition de phase

Un exemple de structure que nous avons réalisée est décrit ci-dessous. La cellule unité (résonateur discret) proposée pour cette étude est présentée sur la Figure 2.44. Elle a été optimisée à l'aide du logiciel de simulation électromagnétique HFSS. Lors de cette phase de conception (où l'on considère que le paramètre  $S_{21}$  équivaut à la transmission de l'échantillon), nous avons cherché à obtenir un comportement présentant une réponse en transmission accordable dans la gamme de fréquences 0.2-1 THz. Ce métamatériau hybride est formé de deux anneaux métalliques en forme de C accolés dos à dos, au centre desquels nous insérons un motif de VO<sub>2</sub>. Dans cette configuration, le passage de l'état isolant à l'état métallique du VO<sub>2</sub> permet de modifier la forme de la cellule unité, ce qui engendre une variation de la réponse fréquentielle du métamatériau. L'électrode qui parcourt la cellule de haut en bas permet quant à elle de relier électriquement les motifs pour une activation électrique globale des motifs de VO<sub>2</sub> (Figure 2.44b).

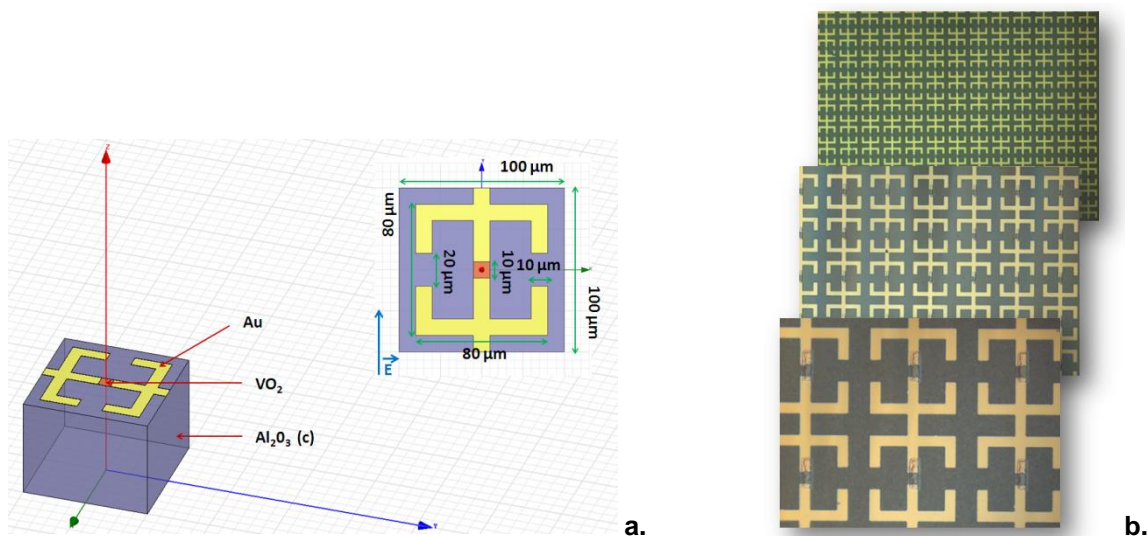


Figure 2.44. a. Vue de la cellule élémentaire (résonateur discret) du métamatériau étudiée et b. images par microscopie optique du dispositif réalisé.

La fabrication du dispositif commence par le dépôt d'un film mince de VO<sub>2</sub> de 120 nm d'épaisseur sur un substrat de saphir c par ablation laser réactive. Des étapes de photolithographies sont, ensuite, nécessaires pour structurer le VO<sub>2</sub> en motifs (gravure par voie humide) et pour réaliser les éléments



métalliques d'or constituant la structure résonnante (lift-off et dépôt par évaporateur à faisceau d'électron). Pour réaliser des mesures en transmission de 0.2 à 1 THz, nous utilisons un banc de spectroscopie térahertz dans le domaine temporel (THz-TDS) [38] représenté sur la Figure 2.6. Afin d'effectuer des mesures à différentes températures, l'échantillon sous test est monté sur un élément Peltier percé au centre afin de laisser passer le signal THz.

Les mesures brutes obtenues par la méthode THz-TDS ne permettent pas d'obtenir directement la transmission de l'échantillon dans le domaine fréquentiel mais l'impulsion temporelle transmise par le matériau. Pour obtenir la transmission en amplitude et en phase dans le domaine fréquentiel, il suffit d'effectuer une transformée de Fourier. Enfin, dans notre cas, nous nous intéressons plus particulièrement à la transmission normalisée qui correspond au rapport entre la transmission de l'échantillon complet (substrat et métamatériau hybride) et la transmission du substrat de saphir seul.

Lors de la phase de fabrication du dispositif nous avons procédé à une série de mesures dans le domaine THz sur la couche de  $\text{VO}_2$  afin de déterminer les effets de la transition MIT sur la transmission du signal (voir également la section 2.1). Les transmissions normalisées expérimentales de la couche de  $\text{VO}_2$  (après le dépôt) à différentes températures sont regroupées sur le graphique de la Figure 2.45. A température ambiante, nous enregistrons une transmission normalisée d'environ 0 dB, caractéristique de l'état isolant du  $\text{VO}_2$ . Lorsque la température augmente, la transmission reste globalement stable jusqu'à 60°C. Mais au-dessus de cette température, au moment où le  $\text{VO}_2$  évolue vers son état métallique, la transmission normalisée chute de façon très importante. Ainsi, à 95°C, la transmission se stabilise à des valeurs inférieures à -10 dB. La transition MIT du dioxyde de vanadium a donc pour effet de faire varier de façon importante la transmission du signal THz, à l'image d'un commutateur. Sur le graphique, quelques incertitudes sur la précision des mesures peuvent être relevées car des valeurs de transmissions sont légèrement supérieures à 0 dB à certaines fréquences. Ces incertitudes sont simplement dues à la conjugaison de la faible épaisseur de la couche de  $\text{VO}_2$  et de la résolution du banc de mesure.

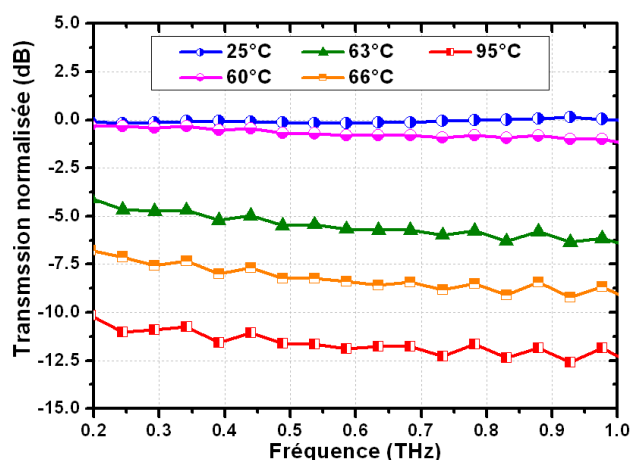


Figure 2.45. Transmission normalisée aux fréquences THz du film de  $\text{VO}_2$  de 120 nm d'épaisseur pour différentes températures.

A l'aide du logiciel de simulation HFSS, nous pouvons prédire les réponses du métamatériau (pour les deux états du  $\text{VO}_2$ ). Pour simplifier les calculs, nous avons considéré que le motif de  $\text{VO}_2$  pouvait être matérialisé par de l'air lorsqu'il est isolant et par de l'or lorsqu'il est métallique. Les transmissions normalisées THz issues de ces deux simulations sont représentées sur la Figure 2.46a. Dans le cas où le résonateur est coupé par un gap d'air en son centre (correspondant à la situation où le  $\text{VO}_2$  est à l'état isolant) le spectre de transmission présente deux pics d'absorption: un premier vers 0.45 THz où la transmission chute en-dessous de -20dB et un second vers 0.80 THz, moins marqué (transmission inférieure à -10dB). Lorsque le gap au centre du résonateur n'existe plus (le  $\text{VO}_2$  est considéré comme un métal), le premier pic se décale vers les basses fréquences en dehors du domaine de mesure. De plus, la transmission entre 0.2 et 0.5 THz est croissante alors qu'à l'état isolant, elle était

décroissante. La structure ainsi modélisée présente donc des réponses différentes en fonction de l'état du  $\text{VO}_2$ .

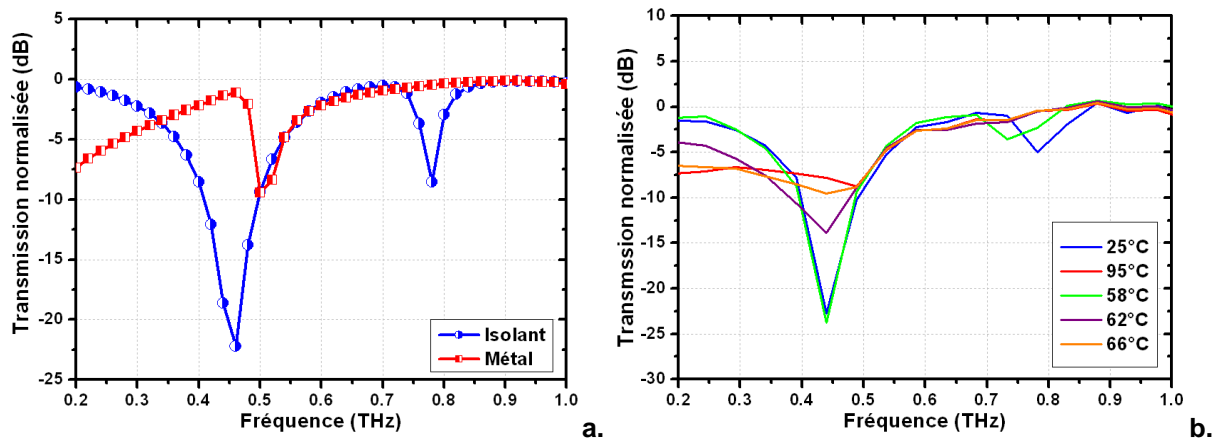


Figure 2.46. a. Réponses en transmission obtenues sous HFSS du métamatériau hybride pour les deux états du dioxyde de vanadium et b. Transmissions normalisées THz expérimentales pour différentes températures.

L'évolution des réponses expérimentales en transmission du métamatériau réalisées, en fonction de la température correspond à celle obtenue en simulation. Ainsi, à 25°C, on retrouve le même comportement décrit par la simulation en considérant le  $\text{VO}_2$  à l'état isolant. Lorsque la température augmente, nous observons la disparition graduelle du pic d'absorption situé aux basses fréquences. C'est entre 58 et 60°C (qui correspond à la zone de transition thermique du  $\text{VO}_2$ ) que l'on observe la plus grande variation de comportement avec, notamment, la disparition de l'absorption autour de 0.8 THz. A partir de 60°C, on retrouve, ainsi, un comportement proche de celui observé lors de la simulation lorsque le  $\text{VO}_2$  est à l'état métallique. On note, néanmoins, une transmission beaucoup plus plate expérimentalement entre 0.2 et 0.5 THz qu'en simulation. Cette différence s'explique par le fait que la conductivité du  $\text{VO}_2$  à l'état métallique est, en réalité, beaucoup moins élevée que celle de l'or qui a été utilisée pour matérialiser le  $\text{VO}_2$  dans l'état métallique lors de la simulation. Une rétro-simulation permettrait de retrouver la conductivité THz équivalente du  $\text{VO}_2$  à l'état métallique. Il est donc possible de faire varier la réponse en transmission du métamatériau réalisé en modifiant les propriétés électriques des motifs de  $\text{VO}_2$  intégrés.

Pour évaluer la transmission THz du métamatériau réalisé en fonction du **déclenchement électrique** de la transition MIT du  $\text{VO}_2$ , nous avons réalisé le montage expérimental présenté sur la Figure 2.47a. Le dispositif est à la fois installé sur un élément Peltier (permettant le contrôle de sa température) mais aussi intégré dans un circuit électrique permettant l'actionnement global (en tension) de tous les motifs de  $\text{VO}_2$  des résonateurs individuels. La Figure 2.47b montre une comparaison entre une mesure de transmission THz faite sur le métamatériau à la température de 58°C **avec et sans l'application d'une tension aux bornes du circuit**. Sans tension, on retrouve bien le comportement du métamatériau lorsque le  $\text{VO}_2$  est isolant, avec la présence des deux pics d'absorption caractéristiques. Lorsqu'une tension suffisante est appliquée au circuit (environ 100 V dans ce cas), la réponse se rapproche du comportement observé à 95°C puisque l'absorption haute fréquences (~0.8 THz) a disparu et celle en basse fréquence entre 0.2 et 0.5 THz a commencé à diminuer de façon importante. L'utilisation d'une commande en tension (déclenchant la transition MIT du  $\text{VO}_2$  – plus probablement par chauffage par effet Joule des motifs) permet donc, de faire varier d'une manière plus souple la réponse en transmission du métamatériau hybride.

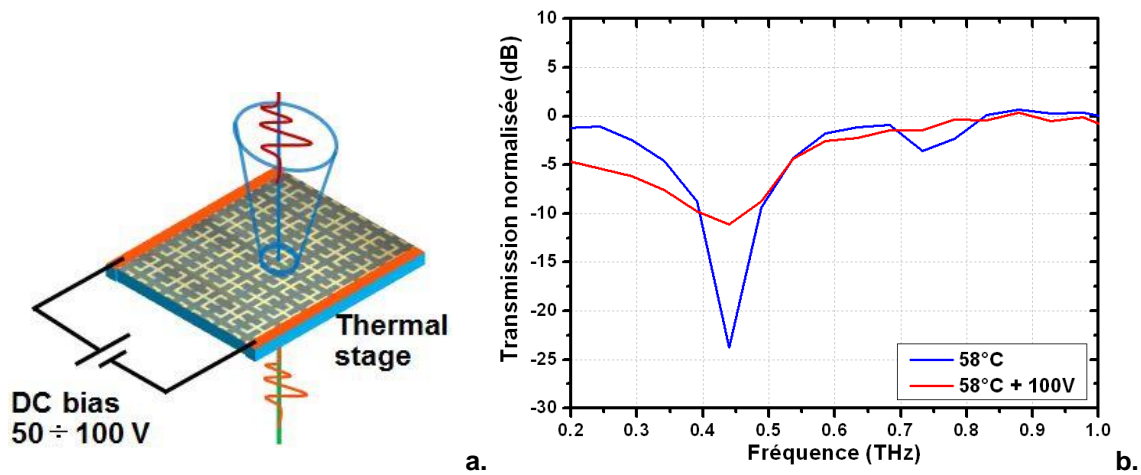


Figure 2.47. a. Principe de mesure THz des métamatériaux accordables électriquement et b. Réponses expérimentales en transmission THz normalisée du métamatériau hybride à 58°C avec et sans tension appliquée.

En **conclusion de cette partie**, nous avons montré l'intérêt de l'utilisation des matériaux à transition de phase (e.g. des films minces de dioxyde de vanadium) pour concevoir des métamatériaux THz accordables thermiquement ou électriquement. Par la suite, nous allons continuer à améliorer la modélisation de telles structures pour pouvoir extraire les constantes diélectriques spécifiques des matériaux et structures hybrides.

Le contrôle électrique de cette transition MIT, associé à des designs spécifiques des dispositifs, permettra de maîtriser de manière rapide la propagation des ondes THz, pour la réalisation de fonctions comme la commutation et la modulation du signal incident ou le filtrage accordable. Actuellement, nous nous focalisons sur la conception des dispositifs métamatériaux hybrides THz avec une **accordabilité induite de façon purement électrique à température ambiante** ainsi que sur la réalisation de **filtres et de composants accordables à métamatériaux hybrides 2D et 3D dans le domaine THz**.

Compte tenu du caractère très large bande de la transition MIT du  $\text{VO}_2$ , ces principes d'intégration hybride et d'activation électrique (ou optique) pour réaliser des métamatériaux à propriétés exotiques peuvent être transposés facilement dans d'autres domaines de fréquences (e.g. dans le domaine optique).

## CONCLUSIONS

**N**ous avons utilisé les propriétés remarquables du matériau VO<sub>2</sub> en couches minces (transition ultra-rapide isolant-métal, MIT, qui est accompagné par une modification abrupte et drastique de ses propriétés électriques et optiques) pour concevoir et développer de **nouveaux concepts de commutateurs et de dispositifs rapides fonctionnant dans les domaines DC, RF - micro-ondes, TéraHertz et optique.**

Les principaux faits marquants à l'état de l'art international dans le cadre de cette activité de recherche sont synthétisés ci-dessous:

- **Démonstration du caractère large bande de la transition MIT (du DC aux fréquences optiques en passant par le THz) des films de VO<sub>2</sub>** obtenus par PLD ou par évaporation à canon d'électrons.
- **Réalisation de fonctions agiles avancées (commutateurs, filtres)** dans les domaines micro-ondes, THz et optique à base de couches minces de VO<sub>2</sub> **dont la transition MIT est déclenchée de manière thermique ou électrique** (en collaboration avec le laboratoire SPCTS et le département Photonique de XLIM).
- Dans le domaine de la commutation optique nous avons utilisé le changement de réflectivité d'un film VO<sub>2</sub> dans le cadre d'une transition isolant-métal pour **réaliser des micro- miroirs à réflectivité variable (commutateurs optiques rapides)**. Nous avons mis en évidence pour la première fois le changement ultra-rapide de transmission/ réflectivité d'un commutateur optique à base de VO<sub>2</sub>, réalisé entièrement électriquement.
- **Démonstration des premiers limiteurs de puissance micro-ondes à base de VO<sub>2</sub>**, pour la protection des têtes de réception de systèmes de communication RF et micro-ondes comme alternative compacte aux solutions existantes. Ces dispositifs très simples peuvent facilement être intégrés dans de nombreux dispositifs microondes et haute fréquences.
- **Conception innovante de filtres hyperfréquences en intégrant des métamatériaux**, (collaboration avec CIMITEC –Espagne (Prof. Ferran Martin)).
- **A un niveau plus fondamental** (mais avec des applications potentiels majeures), nous avons mis en évidence, **la génération d'auto-oscillations électriques** dans des dispositifs à base de films de VO<sub>2</sub>.

Les résultats présentés dans cette partie, nous permettent d'envisager dans un futur proche **plusieurs directions de recherche innovantes basées sur l'utilisation des matériaux présentant des transitions MIT ou des transitions de phase, sous la forme de couches minces ou de nanostructures (nano-agrégats, nano-fils etc.)**. Un bref aperçu de ces actions sera donné dans la partie suivante de ce mémoire.

Les résultats obtenus actuellement sont extrêmement encourageants et ont permis d'avancer rapidement tant au niveau fondamental (compréhension du mécanisme de transition du matériau sous actionnement électrique) qu'au niveau des applications (concepts/ dispositifs innovants pour des applications basses- et hautes-fréquences). Ils ont donnés lieu à de nombreuses publications dans des revues internationales, à des communications lors des congrès nationaux et internationaux et ont permis également de nouer des collaborations avec des partenaires scientifiques et industriels.

**Plusieurs projets collaboratifs avec des partenaires industriels et académiques sont actuellement en cours de montage autours des applications des couches minces de dioxyde de vanadium (ou d'autres matériaux à transition de phase) pour des applications en micro- (et nano-) électronique et optique.**

## REFERENCES

T1 : Julien GIVERNAUD : « *Etude, conception et fabrication de dispositifs micro-ondes à base de matériaux intelligents type VO<sub>2</sub>* » Thèse de doctorat : électronique des hautes fréquences et optoélectronique. Limoges : Université de Limoges, 2010.

Disponible sur <<http://epublications.unilim.fr/theses/2010/givernaud-julien/givernaud-julien.pdf>>

T2 : Jonathan LEROY "Composants et dispositifs accordables pour la microélectronique et l'optique à base de matériaux intelligents à transition de phase" ; cette thèse est cofinancé par la Fondation EADS dans le cadre du projet « *Métamatériaux dans le domaine THz basés sur la réponse non-linéaire des matériaux à transition de phase* » (2011-2013), soutenance prévue octobre 2013.

T3 : Marc FABERT « *Systèmes lasers intégrant des micro-miroirs déformables a base de MEMS optiques* » . Thèse de doctorat : électronique des hautes fréquences et optoélectronique. Limoges: Université de Limoges, 2010.

Disponible sur <<http://epublications.unilim.fr/theses/2010/fabert-marc/fabert-marc.pdf>>

[1] D. M. Pozar, *Microwave Engineering – 3rd ed.*, J. Wiley & Sons, 2005.

[2] G. M. Rebeiz, *RF MEMS Theory, Design, and Technology*, New Jersey: J. Wiley & Sons, 2003.

[3] S. Gevorgian, "Tuneable Materials for Agile Microwave devices, an overview", 38th European Microwave Conference Workshop WWE-6 (EuMC/EuMIC/EuWiT) "Reconfigurable RF Systems", paper WWE-6-6, 27-31 October 2008, Amsterdam, The Netherlands, 2008.

[4] N.F. Mott, "Metal-Insulator Transition" Review of Modern Physics 40(4), pp. 677-683, 1968.

[5] Z. Yang, C. Ko, & S. Ramanathan, "Oxide Electronics Utilizing Ultrafast Metal-Insulator Transitions" Annual Review of Materials Research, 41(1), 337-367. doi: 10.1146/annurev-matsci-062910-100347, 2011.

[6] T. M. Rice and D. B. McWhan, "Metal-Insulator Transition in Transition Metal Oxides", IBM-JRD, v. 14(3), pp. 251-257, 1970.

[7] S. D. Ha, S. Ramanathan, "Adaptive oxide electronics: A review." Journal of Applied Physics, 110(7), 071101. doi: 10.1063/1.3640806, 2011.

[8] F. Morin, "Oxide which shows a metal-to-insulator transition at the high temperature", Phys. Rev. Lett. **3**, 34, 1959.

[9] A. Pergament, "Metal-insulator transition: the Mott criterion and coherence length" J. Phys.: Condens. Matter 15, 3217–3223, 2003.

[10] G. Stefanovich, A. Pergament & D. Stefanovich, "Electrical switching and Mott transition in VO<sub>2</sub>" J. Phys.: Condens. Matter, v. 12, pp. 8837-8845, 2000.

[11] H.-T Kim, B.-G. Chae, D.-H. Youn, S.-L. Maeng, G. Kim, K.-Y. Kang, Y.-S. & Lim, "Mechanism and observation of Mott transition in VO<sub>2</sub>-based two- and three-terminal devices", *New J. Phys.* v. 6, pp. 52-70, 2004.

[12] H.-T. Kim, B.-J. Kim, Y. W. Lee, B.-G. Chae, & S.J. Yun, "Switching of the Mott transition based on hole-driven MIT theory", *Physica B* v.403, pp.1434–1436, 2008.

[13] A. Cavalleri, Cs. Tóth, C.W. Siders, , J.A. Squier, F. Ráksi, P. Forget & J. C. Kieffer, "Femtosecond Structural Dynamics in VO<sub>2</sub> during an Ultrafast Solid-Solid Phase Transition", *Physical Review Letters*, 87(23) 237401-1 - 237401-4, 2001.

[14] A. Cavalleri, Th. Dekorsky, H.H.W. Chong, J.C. Kieffer & R.W. Schoenlein, "Evidence for a structurally-driven insulator-to-metal transition in VO<sub>2</sub>: A view from the ultrafast timescale", *Phys. Rev. B. rapid commun.* 70, 161102(R), 2004.



- [15] J. Sakai, & M. Kurisu, "Effect of pressure on the electric-field-induced resistance switching of VO<sub>2</sub> planar-type junctions", *Phys. Rev. B* 78(3), art. No. 033106, 2008.
- [16] M. Stotz, S.-D. Fritze, H. Downar & J. Wenger, "Thermally Controlled Coplanar Microwave Switches", *29th European Microwave Conference Proceedings*, pp.415-418, 5-7 October 1999 Munich, Germany.
- [17] P. J. Hood, & J. F. DeNatale, "Millimeter-wave dielectric properties of epitaxial vanadium dioxide thin films", *Appl. Phys. Lett.*, v. 70(1) pp. 376-381, 1991.
- [18] F. Dumas-Bouchiat, C. Champeaux, A. Catherinot, **A. Crunteanu**, & P. Blondy, "RF-Microwave switches based on reversible semiconductor-metal transition of VO<sub>2</sub> thin films synthesized by pulsed laser deposition", *Applied Physics Letters*, 91, pp.223505-1-3, 2007.
- [19] F. Dumas-Bouchiat, C. Champeaux, A. Catherinot, J. Givernaud, A. Crunteanu, & P. Blondy, "RF Microwave Switches Based On Reversible Metal-Semiconductor Transition Properties Of VO<sub>2</sub> Thin Films: An Attractive Way To Realise Simple RF Microelectronic Devices" in "Materials and Devices for Smart Systems III", edited by J. Su, L-P. Wang, Y. Furuya, S. Troler-McKinstry, J. Leng, MRS Symp. Proc. Vol. 1129, Warrendale, PA, paper 1129-V14-01, 2009.
- [20] M. S. Laad, L. Craco & E. Muller-Hartmann, "Metal-insulator transition in rutile-based VO<sub>2</sub>", *Phys. Rev. B* 73, 195120, 2006.
- [21] M. M. Qazilbash, M. Brehm, B.-G. Chae, P.-C. Ho, G. O. Andreev, B.-J. Kim, S.J. Yun, A.V. Balatsky, M. B. Maple, F. Keilmann, H.-T. Kim & D. N. Basov, "Mott transition in VO<sub>2</sub> revealed by infrared spectroscopy and nano-imaging", *Science* 318, 1750, 2007.
- [22] Y.W. Lee, B.J. Kim, S. Choi, H.-T. Kim, & G. Kim, "Photo-assisted electrical gating in a two-terminal device based on vanadium dioxide film", *Optics Express* 15 (19), 12108-12113, 2007.
- [23] C. Chen, R. Wang, L. Shang, & C. Guo, "Gate-field-induced phase transitions in VO<sub>2</sub>: Monoclinic metal phase separation and switchable infrared reflections", *Appl. Phys. Lett.* 93, art. No.171101 2008.
- [24] I. Kitahiro & A. Watanabe, "Shift of transition temperature of vanadium dioxide crystals", *Jpn. J. Appl. Phys.* 6, 1023–1024, 1967.
- [25] C. Kim, J.S. Shin & H. Ozaki, "Effect of W doping in metal-insulator transition material VO<sub>2</sub> by tunnelling spectroscopy", *J. Phys. Condens. Matter* 19, 096007-1-7, 2007.
- [26] X. Yi, S. Chen, Y. Wang, B. Xiong, & H. Wang, "VO<sub>2</sub>-based infrared microbolometer array", *Intl. J. of Infrared and Millimeter Waves* 23(12), 1699- 1704, 2002.
- [27] G. Li, X. Wang, J. Liang, A. Ji, M. Hu, F. Yang, J. Liu, N. Wu & H. Chen, "Low Temperature Deposited Nano-structured Vanadium Oxide Thin Films for Uncooled Infrared Detectors". *2<sup>nd</sup> IEEE International Nanoelectronics Conference (INEC 2008)*, pp. 921- 923, March 24-27, 2008, Pudong-Shanghai, China.
- [28] T.D. Manning, I.P. Parkin, R.J.H. Clark, D. Sheel, M.E. Pemble, & D. Vernadou, "Intelligent window coatings: atmospheric pressure chemical vapour deposition of vanadium oxides", *J. Mater. Chem.* 12, 2936–2939, 2002.
- [29] M.A. Richardson, & J.A. Coath, "Infrared optical modulators for missile testing", *Optics & Laser Technology* 30, 137-140, 1998.
- [30] L. Jiang & W.N. Carr, "Design, fabrication and testing of a micromachined thermo-optical light modulator based on a vanadium dioxide array", *J. Micromech. Microeng.* 14 833–840, 2004.
- [31] **A. Crunteanu**, M. Fabert, J. Givernaud, V. Kermene, A. Desfarges-Berthelemot, J.C. Orlianges, C. Champeaux, A. Catherinot, "Vis-IR Optical switching modulation based on the electrically activated phase transition of VO<sub>2</sub> thin films", *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) and QELS* (OSA, Washington DC, 2010), San Jose, CA, USA, presentation number JWA88, May 16-21, 2010.

- [32] G. Guzman, F. Beteille, R. Morineau & J. Livage, "Electrical switching in VO<sub>2</sub> sol-gel films", J. Mater. Chem. 6(3), 505-506, 1996.
- [33] J.C.C. Fan, H.R. Feterman, F.J. Bachner, P.M. Zavracky, & C.D. Parker, "Thin-film VO<sub>2</sub> submillimeter-wave modulators and polarizers", Appl. Phys. Lett. 31 (1), 11-13, 1977.
- [34] M. Dragoman, A. Cismaru, H. Hartnagel, & R. Plana, "Reversible metal-semiconductor transitions for microwave switching applications", Appl. Phys. Lett. **88**, 073503-1 - 073503-3, 2006.
- [35] C. H. Griffiths, & H. K. Eastwood, "Influence of stoichiometry on the metal-semiconductor transition in vanadium dioxide", J. Appl. Phys. 45, 2201-2206, 1974.
- [36] G. Garry, O. Durand, & A. Lordereau, "Structural, electrical and optical properties of pulsed laser deposited VO<sub>2</sub> thin films on R- and C-sapphire planes", Thin Solid Films 453, 427, 2004.
- [37] J. Leroy, A. Bessaoudou, F. Cosset, **A. Crunteanu** "Structural, electrical and optical properties of thermochromic VO<sub>2</sub> thin films obtained by reactive electron beam evaporation", Thin Solid Films 520, pp. 4823-4825, 2012.
- [38] P.U. Jepsen, B.M. Fischer, A. Thoman, H. Helm, J.Y. Suh, R. Lopez, and R.F. Haglund Jr., "Metal-insulator phase transition in a VO<sub>2</sub> thin film observed with terahertz spectroscopy", Phys. Rev. B, v. 74, pp. 205103-1-9, 2006.
- [39] J. Leroy, **A. Crunteanu**, A. Bessaoudou, F. Cosset, C. Champeaux, and J.-C. Orlanges, "High-speed metal-insulator transition in vanadium dioxide films induced by an electrical pulsed voltage over nano-gap electrodes", Appl. Phys. Lett. 100, 213507, 2012; <http://dx.doi.org/10.1063/1.4721520>.
- [40] J. Leroy, **A. Crunteanu**, J. Givernaud, J.-C. Orlanges, C. Champeaux, P. Blondy, "Generation of electrical self-oscillations in two-terminal switching devices based on the insulator-to-metal phase transition of VO<sub>2</sub> thin films" International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 4(01), pp. 101-107, 2012.
- [41] **A. Crunteanu**, J. Givernaud, J. Leroy, D. Mardivirin, C. Champeaux, J.-C. Orlanges, A. Catherinot and P. Blondy, "Voltage- and current-activated metal-insulator transition in VO<sub>2</sub>-based electrical switches: a lifetime operation analysis", Sci. Technol. Adv. Mater. **11**, 065002 (6pp), 2010.
- [42] H.-T. Kim, B.-J. Kim, S. Choi, B.-G. Chae, Y. W. Lee, M.-M. Driscoll, T. Qazilbash D. N. Basov, "Electrical oscillations induced by the metal-insulator transition in VO<sub>2</sub>", Journal of Applied Physics, 107(2), 023702. doi: 10.1063/1.3275575, 2010.
- [43] J. Sakai, "High-efficiency voltage oscillation in VO<sub>2</sub> planer-type junctions with infinite negative differential resistance", Journal of Applied Physics, 103(10), 103708. doi: 10.1063/1.2930959, 2008.
- [44] B. van der Pol, "On relaxation-oscillations", Phil. Mag. Ser. 7, 2, 978-92, 1926.
- [45] B. van der Pol and J. van der Mark "Frequency demultiplication", Nature 120,364, 1927.
- [46] S. O. Pearson and H. S. G. Anson, "The neon tube as a means of producing intermittent currents", Proc. Phys. Soc. Lond. 34, 204, 1921.
- [47] S. O. Pearson and H. S. G. Anson, "Demonstration of some electrical properties of neon-filled lamps" Proc. Phys. Soc. Lond. 34, 175, 1921.
- [48] J. Givernaud, C. Champeaux, A. Catherinot, A. Pothier, P. Blondy, **A. Crunteanu**, "Tunable band stop filters based on metal insulator transition in vanadium dioxide thin films", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, IMS 2008*, WEP1D-02, Atlanta, Georgia, USA, 15-20 June 2008
- [49] **A. Crunteanu**, J. Givernaud, P. Blondy, J.-C. Orlanges, C. Champeaux and Alain Catherinot, "Exploiting the semiconductor-metal phase transition of VO<sub>2</sub> materials: a novel direction towards tuneable devices and systems for RF-microwave applications", in *Advanced Microwave and Millimeter*

Wave Technologies Semiconductor Devices Circuits and Systems, Moumita Mukherjee (Ed.), ISBN: 978-953-307-031-5, INTECH, 2010.

[50] D. Bouyge, P. Blondy, **A. Crunteanu**, A. Pothier, "X band switched RF-MEMS band reject filter", *MEMSWAVE 2008, 9th International Symposium on RF MEMS and RF Microsystems*, Héraklion, Crète, Grèce, 30 Juin - 3 Juillet 2008.

[51] D. Bouyge, **A. Crunteanu**, J.-C. Orlianges, D. Passerieux, C. Champeaux, A. Catherinot, A. Velez, J. Bonache, F. Martin, P. Blondy, "Reconfigurable Bandpass Filter Based on Split Ring Resonators and Vanadium Dioxide (VO<sub>2</sub>) Microwave Switches", *Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2009)*, December 7-10, 2009, Singapore, art. no. 5385450, pp. 2332-2335.

[52] D. Bouyge, **A. Crunteanu**, O. Massague, J.C. Orlianges, C. Champeaux, A. Cathierinot, A. Velez, J. Bonache, F. Martin, P. Blondy, "Applications of Vanadium Dioxide (VO<sub>2</sub>)-loaded Electrically Small Resonators in the Design of Tunable Filters", *EuMW 2010, European Microwave Week*, Paris, France, 26 septembre – 1er octobre 2010.

[53] J. Givernaud, **A. Crunteanu**, J.C. Orlianges, A. Pothier, C. Champeaux, A. Catherinot, P. Blondy, "Microwave power limiting devices based on the semiconductor metal transition in Vanadium dioxide thin films", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **58** (9), art. no. 5545454, pp. 2352-2361, 2010.

[54] A. Phommahaxay, G. Lissorgues, L. Rousseau, T. Bourouina and P. Nicole, "Towards a Frequency-Selective Microwave Power Limiter for Defense and Aerospace Applications", *Proceedings of the 4th European Radar Conference EuMA*, Munich, Germany, pp. 335- 338, October 2007.

[55] J. C. Booth, K. Leong and S. A. Schima, "A superconducting microwave power limiter for high-performance receiver protection", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 139-142, June 2004.

[56] **A. Crunteanu**, E. Lemoine, J. Leroy, D. Passerieux, P. Leveque, P. Blondy, C. Gaquiere, D. Ducatteau, J.-C. Orlianges, and C. Champeaux, "Pulsed power operation of power limiters integrating a phase transition material", *IMS2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, 2-7 June 2013, Seattle, WA, USA, paper TH3G-6, oral presentation.

[57] **A. Crunteanu**, J. Leroy, G. Humbert, D. Ferachou, J. Orlianges, C. Champeaux, P. Blondy, "Tunable Terahertz Metamaterials based on Metal-Insulator Phase Transition of VO<sub>2</sub> Layers", *IMS2012, IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 17–22 June 2012, Montréal, Québec, Canada, oral presentation, paperTH2C-4

[58] J. B. Pendry, A. Holden, D. Robbins, and W. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, v.. 47, no. 11, pp. 2075–2084, 1999.

[59] H. T. Chen, J. F. O'Hara, A. K. Azad, and A. J. Taylor, "Manipulation of terahertz radiation using metamaterials", *Laser Photonics Rev* 1-21, 2011.

**A** travers ces deux premiers chapitres, j'ai présenté de manière succincte une partie de mes activités de recherche orientés vers : i) le développement des dispositifs M(O)EMS pour la réalisation des systèmes lasers à fibres impulsions innovants et ii) l'étude et l'intégration de matériaux à transition de Mott (dioxyde de vanadium) dans des composants électriques et optiques pour la réalisation de fonctions de commutations ou de filtrage sur différentes bandes de fréquences.

Nous avons donc démontré *la possibilité d'intégrer des microéléments électromécaniques (MOEMS) type ponts ou cantilevers comme miroirs achromatiques déformables et les utiliser en tant que modulateurs (régime Q-switch ou régime à synchronisation des modes longitudinaux) dans des systèmes lasers à fibres dont la fréquence de récurrence est rendue ajustable*. Le faible coût de ces éléments, leur robustesse et leur faible niveau d'activation (10 V-50 V) en font de bons candidats pour remplacer les solutions de modulations (électro- ou acousto-optiques) actuels. Cette intégration innovante nous a permis d'obtenir des résultats à l'état de l'art concernant :

- le développement des systèmes lasers à fibres mono ou multi- longueur d'onde à déclenchement électromécanique,
- la durée des impulsions laser obtenues de l'ordre de la dizaine de nanoseconde, avec des puissances moyennes proches du Watt,
- la possibilité d'obtenir des impulsions laser à fréquence de récurrence ajustable de manière continue (en régime Q-switch),
- la première démonstration d'un laser fibré à MOEMS fonctionnant en régime de synchronisation des modes longitudinaux,
- la démonstration du multiplexage temporel et spectral de sources lasers à MOEMS pour un fonctionnement à haute cadence ou à sommation de puissance,
- et la mise au point de systèmes lasers à MOEMS spécifiques pour des applications biomédicales (sélection spectrale d'une source laser blanche, combinaison non-linéaire de plusieurs sources pour la sommation de fréquences et émission dans le domaine visible).

Nos activités de recherche *concernant les matériaux à transition de Mott tel que le VO<sub>2</sub>*, ont permis de réaliser des avancées considérables à plusieurs niveaux (fondamental et applicatif) :

- Mise en forme et élaboration de matériaux à transition de phase type VO<sub>2</sub> (en utilisant les techniques de dépôts par PLD ou par évaporation à canon d'électrons),
- Caractérisation de leurs propriétés optiques et électriques et identification de nouveaux phénomènes fortement non-linéaires (résistances négatives, auto-oscillations, comportement memristive etc.),
- Réalisation de dispositifs optiques et électriques (DC, RF-micro-ondes, THz) innovants (commutateurs rapides pour le domaine RF-micro-ondes/ THz, modulateurs optiques, limiteurs de puissance etc.).

La combinaison des études au niveau fondamental pour la compréhension des phénomènes non-linéaires des matériaux à transition de phase, et des développements technologiques pour la conception de dispositifs (électriques et optiques) avancés, nous a permis d'étendre nos recherches vers d'autres champs d'applications dans le domaine des micro- et nanotechnologies (méta-matériaux accordables dans le domaine THz et optique, capteurs large bande extrêmement sensibles (température, pression, gazes), memristances etc.).

## OBJECTIFS DE RECHERCHE A MOYEN ET LONG TERME

Dans la suite logique des travaux présentés précédemment, mes futures activités de recherche se concentreront principalement sur ***l'étude et l'intégration de matériaux à changement de phase ou de matériaux corrélés (à transition de Mott)***. En effet, leur transition de phase ultra-rapide, en fait d'***excellents candidats pour des dispositifs innovants dans divers domaines d'applications comme le traitement de l'information, l'énergie ou la détection de grandeurs physiques variées***.

A titre d'exemple, la Figure 3.1 illustre la multitude de concepts physiques et d'applications potentielles des oxydes corrélés avec une transition isolant-métal (MIT)<sup>4</sup>.

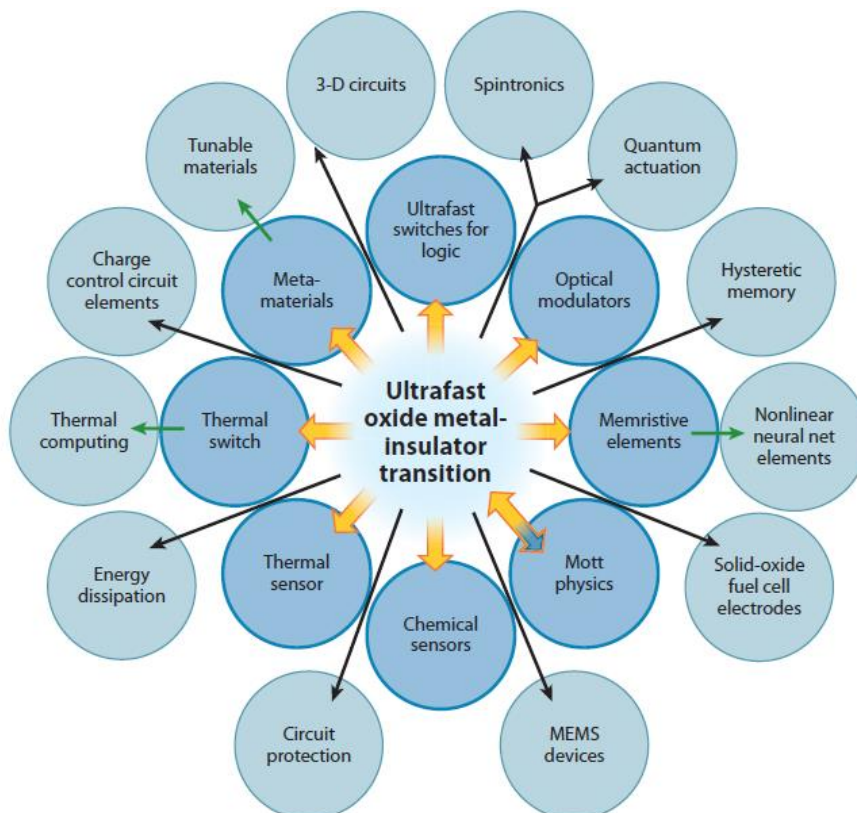


Figure 3.1. Illustration des dispositifs et concepts utilisant la MIT dans les oxydes corrélés.

Les activités de recherche que j'envisage de développer dans ce domaine s'intègrent dans la stratégie scientifique du laboratoire XLIM et du labex  $\Sigma$ -LIM, à la fois orientées vers la recherche amont mais avec une forte composante applicative dans des axes prioritaires comme les fonctions et systèmes sécurisés (***Front-End RF, réseaux de capteurs***), ***l'énergie ou encore la santé***.

Dans les lignes suivantes je vais donner un aperçu non-exhaustif de certaines directions de recherches que nous poursuivrons dans les prochaines années.

<sup>4</sup> Z. Yang, C. Ko, & S. Ramanathan, "Oxide Electronics Utilizing Ultrafast Metal-Insulator Transitions" Annual Review of Materials Research, 41(1), 337-367, 2011.



## ELABORATION ET CARACTERISATION DE NANO-FILS SEMI-CONDUCTEURS ET METALLIQUES POUR DES DISPOSITIFS HYBRIDES A RECUPERATION D'ENERGIE

*Ce projet est développé à l'interface des équipes OptoPlast et MINT du département MINACOM de XLIM et de l'Axe 1 (« Procédés Céramiques ») du SPCTS.*

L'intérêt scientifique croissant au niveau fondamental des systèmes unidimensionnels (nano-fils, nanotubes ou encore des nano-tiges) est, dernièrement de plus en plus associé à des applications pratiques. En effet, ces systèmes sont en train de devenir des briques de base pour une nouvelle génération de dispositifs électroniques et optoélectroniques à l'échelle nanométriques affichant des performances nettement supérieures à leurs homologues intégrant les matériaux sous forme massive ou en couches minces, pour des applications dans les domaines de la conversion et la capture d'énergie.

Par rapport aux matériaux massifs ou structurés en couches minces poly-cristallines, les structures cristallines à base de nano-fils métalliques ou d'oxydes semi-conducteurs présentent des **caractéristiques spécifiques liées à leur géométrie quasi unidimensionnelle**. Notamment, leurs propriétés de transport électronique sont généralement exaltées dans la direction des fils et il est ainsi possible de les contrôler au travers de leurs propriétés structurales et morphologiques. Ces caractéristiques en font de très bons candidats pour la prochaine génération de composants électroniques et optoélectroniques. De plus, la non-toxicité généralement de ces nano-fils et la production relativement facile avec des techniques « bottom-up » peu coûteuses, permettent d'envisager une perspective viable pour leur assemblage à grande échelle et leur intégration dans des dispositifs fonctionnels. Actuellement, ces nanostructures 1D peuvent être fabriquées et assemblées avec des **formes, des compositions et des architectures spécifiques**. De plus, leur synthèse peut être adaptée pour une fabrication grande échelle et une intégration réelle dans des dispositifs fonctionnels. Un point primordial en termes **d'intégration**, les nano-fils obtenus peuvent être exploités directement sur substrats (tapis de nano-fils alignés), mais ils peuvent aussi être récupérés pour être isolés ou pour être dispersés dans des solvants ou des matrices variées.

Dans ce contexte, l'objectif de nos recherches est **l'élaboration et l'étude à l'échelle nanométrique de la structure et des propriétés de nano-fils métalliques et semi-conducteurs (oxydes métalliques)**. Ces nano-fils seront à terme intégrés à des dispositifs hybrides destinés à la récupération d'énergie. Ce projet constitue en fait la première étape visant à fabriquer les briques de base permettant la conception de **nano-sources** ou **nano-générateurs** exploitant les différentes formes d'énergie présentes dans l'environnement pour alimenter des dispositifs ou des systèmes communicants miniaturisés (capteurs) autonomes. La récupération d'énergie exploitera la conversion **photovoltaïque, thermoélectrique, ou piézoélectrique**, ou une combinaison de plusieurs de ces effets. Concrètement, nous visons l'implémentation d'une technique couplant l'évaporation/condensation (EC) de précurseurs chimiques avec une technique de croissance catalysée en phase vapeur, telle que la technique de croissance vapeur-liquide-solide (VLS). Cette technique nous permettra par exemple de faire croître des nanostructures et nano-fils métalliques d'argent (Ag), pour l'élaboration d'électrodes transparentes au sein de futures nano-sources, ainsi que des nano-fils d'oxydes métalliques ou à transition de phase (e.g. ZnO, VO<sub>2</sub>), bien identifiés pour leurs potentialités dans les domaines de la conversion photovoltaïque hybride et de la conversion piézoélectrique.

Le contexte des nano-générateurs est un domaine en plein développement au niveau international. Plusieurs articles de revues récents décrivent la possibilité de récupérer l'énergie environnante à un micro-dispositif ou nano-dispositif dans le but de l'alimenter à l'aide des effets piézoélectrique, triboélectrique, pyroélectrique, thermoélectrique, ou photovoltaïque, ou bien à l'aide d'une combinaison hybride de plusieurs de ces effets. Les oxydes de type ZnO ou VO<sub>2</sub> sont, dans ce contexte, bien identifiés comme matériaux de choix pour ces applications.

A titre d'exemple, en raison de ses bonnes propriétés électroniques et de sa non-toxicité, l'oxyde de zinc s'est avéré être un matériau de choix pour les dispositifs piézoélectriques à récupération d'énergie. De telles nano-sources sont généralement constituées d'un tapis de nano-fils de ZnO alignés verticalement entre deux électrodes (Figure 3.2). Sous l'action d'une contrainte mécanique extérieure (déformation, pression), une polarisation des nano-fils apparaît, générant sous certaines conditions un flux d'électrons dans le circuit extérieur. Ces nano-générateurs piézo-électriques peuvent donc permettre de récupérer l'énergie des vibrations environnantes pour alimenter des dispositifs électroniques basse consommation, conduisant à des dispositifs autonomes (capteurs physiques ou biologiques).

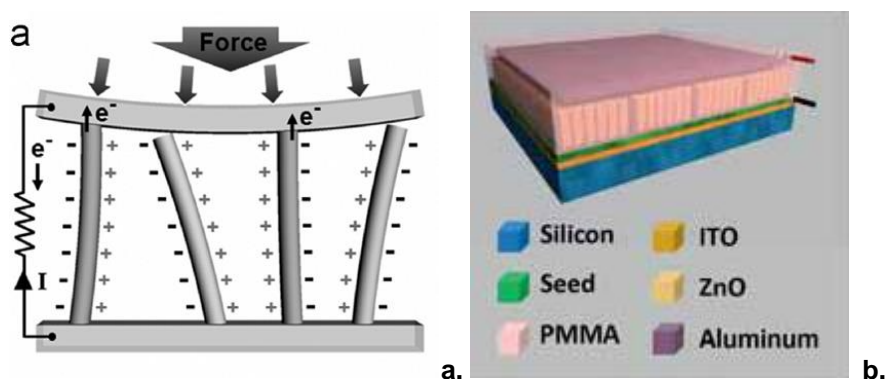


Figure 3.2. a. Schéma de principe d'un nano-générateur piézoélectrique à base de nanofils de ZnO<sup>5</sup> et b. structure d'un nano-générateur piézoélectrique à base de nano-fils de ZnO alignés<sup>6</sup>.

A l'échelle nationale, malgré quelques travaux prometteurs, le développement de nano-générateurs reste relativement peu représenté et éparse. Ce projet exploratoire, qui s'inscrit dans une démarche locale plus globale pilotée au sein du labex, peut donc contribuer à un positionnement original dans le paysage français et européen concernant la gestion intelligente d'un réseau de capteurs autonome alimenté par des micro ou nano-sources.

Dans le cadre de ce projet, nous développerons la méthode VLS au laboratoire pour montrer, dans un premier temps, sa capacité en termes :

- d'élaboration de nano-fils d'Ag adaptés au développement d'électrodes transparentes conductrices compétitives par rapport aux électrodes de référence à base d'ITO (oxyde d'indium dopé étain). Ces électrodes seront implémentées dans des nano-sources, mais pourront aussi être exploitées dans des dispositifs variés de l'optoélectronique (cellules photovoltaïques, diodes électroluminescentes, etc.).
- d'élaboration de nano-fils de ZnO et VO<sub>2</sub> adaptés au développement de composants piézoélectriques visant la récupération de l'énergie mécanique ou lumineuse.

Dans un second temps, nous visons la caractérisation locale des nano-fils élaborés à l'aide des techniques conventionnelles disponibles aux laboratoires XLIM et SPCTS, et permettant de révéler la structure et la morphologie des nano-fils (observations par microscopies électroniques et en champ proche), mais aussi leurs propriétés optiques et électriques (photoluminescence, conductivité électrique, etc.).

Nous chercherons donc à maîtriser le procédé de synthèse VLS pour aboutir à un contrôle fin des propriétés des nano-fils (dimensions, structure, structuration sur le substrat, etc.). **Cette méthode pourra facilement être adaptée à l'élaboration d'autres matériaux complexes sous forme de nano-fils (ou matériaux bidimensionnels) pour l'élaboration de nanostructures**

<sup>5</sup> B. Kumar, S.-W. Kim, *Nano Energy* 2012, **1**, 342,

<sup>6</sup> Z. L. Wang, G. Zhu, Y. Yang, S. Wang, C. Pan, *Materials Today* 2012, **15**, 532.

**thermoélectriques, de mémoires résistives à base de matériaux à transition de phase, ou pour l'interfaçage avec des membranes biologiques.** La technique de synthèse proposée permettra de fédérer et d'élargir les compétences des partenaires impliqués concernant les procédés de synthèse de matériaux nano-structurés. Une étape amont visant au développement de substrats précurseurs (*seed layers*) par le partenaire SPCTS sera notamment indispensable pour contrôler de façon fine les propriétés des nano-fils synthétisés. Plus généralement, la technique de synthèse VLS pourra être exploitée au travers d'autres partenariats visant à exploiter d'autres matériaux (céramiques, semi-conducteurs inorganiques, matériaux à transition de phase, matériaux d'intérêt biologique, etc). Les champs d'applications sont nombreux au sein des instituts locaux, mais aussi via des partenariats industriels (certains industriels ont montré un intérêt pour l'élaboration de nano-fils semi-conducteurs par exemple).

Au-delà des aspects purement scientifiques, notre projet s'inscrit dans une **démarche de structuration des activités de recherche menées au sein des instituts XLIM et IPAM (SPCTS en particulier) autour des nanomatériaux (nanoparticules, nano-fils)**. Ce projet exploratoire constitue en particulier une étape dans le cadre de la feuille de route de la thématique « Energie, Environnement » du labex  $\Sigma$ -LIM. A moyen terme, dans le cadre d'un projet plus large, nous visons la réalisation de nano-générateurs hybrides (photovoltaïques/piézoélectriques) en tant que micro-sources autonomes d'énergie pour des applications nomades ou réseaux de capteurs.

## **EFFETS NON LINEAIRES (ELECTRIQUES, OPTIQUES) DANS LES MATERIAUX A TRANSITION DE PHASE**

*Ces activités sont développées en partie dans l'action « Nouveaux paradigmes pour la modélisation/simulation des composants et circuits nanométriques » de l'action transverse MIRES « Mathématiques et Interactions » & « Réseaux et sécurité » du pôle PRES Limousin Poitou-Charentes – collaboration inter-départements XLIM : C2S2/ MINACOM/ DMI, ainsi que dans le cadre des collaborations avec les laboratoires SPCTS et LAAS.*

Le développement rapide de composants et technologies nanométriques soulève souvent des défis liés à leur représentation physique et à la modélisation des résultats de mesures de ce type de nano-composants et systèmes. La diminution de la taille des dispositifs induit, dans la plupart des cas, une réponse fortement non-linéaire lors des stimulations couramment exercées pour leur caractérisation. En particulier, l'essor de la nanoélectronique, avec la découverte de composants et dispositifs possédant des propriétés non-linéaires (nano-fils, nanotubes de carbone, nano-agrégats, et films nano-composites, couches de graphène etc.) favorise des recherches de type « component driven » (recherches orientées par le(s) propriété(s) du composant) à la défaveur du type de recherche « application driven ». Souvent, même s'ils possèdent des propriétés spectaculaires du point de vue fondamental, ces composants nanométriques sont difficilement intégrables à un système. En effet, leur co-intégration avec des éléments de circuits linéaires (comme condition sine-qua-non pour leur fonctionnement dans un système d'information) se heurte à plusieurs aspects :

- Le manque de modèles réalistes des circuits non-linéaires permettant à la fois de catégoriser les différentes familles des dispositifs nanométriques mais aussi de fournir des outils pratiques de co-intégration aux concepteurs/ designers de circuits et systèmes.
- Le signal issu des dispositifs nanométriques est souvent du même ordre de grandeur que le bruit, nécessitant une amplification avec des techniques complexes pour limiter les interférences.
- L'existence de conditions limites de l'état des composants engendre des phénomènes physiques à l'échelle nanométrique mal connus (phénomènes d'émission de champ, d'auto oscillations, tunneling etc.)

Plusieurs outils mathématiques et traitements théoriques ont été proposés pour modéliser, améliorer et favoriser une meilleure intégration de ce type de dispositifs. Un des développements les

plus intéressants dernièrement est ***l'introduction de la notion de memristor (memory resistor) comme élément de circuit fondamental*** (avec la résistance, l'inductance et la capacité) basée sur une théorie mathématique conduisant à la définition d'une famille complète d'éléments de circuits non-linéaires. Cet ensemble permet de modéliser et d'uniformiser la représentation des nano dispositifs non-linéaires, haute fréquence.

Une autre approche intéressante est ***l'application dans l'étude des réponses des dispositifs nanométriques du formalisme de la résonance stochastique, pour la transmission des signaux faibles***, amplifiées par le bruit (en certains cas, l'ajout de bruit à un signal non-linéaire peut amplifier et augmenter la durée de vie du signal). Le phénomène de résonance stochastique a été observé dans une large variété de systèmes biologiques et joue un rôle essentiel dans la transmission des signaux dans des systèmes neuronaux constamment exposés au bruit ambiant.

Nous disposons au laboratoire (ou/ et en collaboration avec des laboratoires partenaires comme le SPCTS) de plusieurs véhicules de test/ composants permettant d'étudier, de vérifier et d'appliquer les formalismes mathématiques mentionnés ci-dessus : dispositifs à deux- et trois-terminaux à base de couches minces nano-composites (matrice diélectrique dopée avec des agrégats nanométriques), des matériaux à transition de phase ( $\text{VO}_2$ ) ou encore des nanotubes de carbone ou des matériaux inorganiques alignés.

Des dispositifs micro- et nanométriques à base de  $\text{VO}_2$  pourront être les véhicules-tests de choix, car ils possèdent des caractéristiques non-linéaires très intéressantes du point de vue fondamental (étude en cours en tant que système memristif, phénomènes de percolation des sites isolants-métalliques engendrant des phénomènes d'auto oscillations, apparition d'une zone de résistance négative différentielle, etc.) mais aussi au niveau des applications (commutateurs électriques large bande du domaine DC aux fréquences THz, filtres, limiteurs de courant ou puissance micro-ondes, miroirs et modulateurs optiques etc.). Dans les dispositifs, nous recherchons à identifier à l'échelle nanométrique les phénomènes mis en jeu lors de la transition MIT et de l'apparition de la résistance différentielle négative (NDR) (percolation des domaines isolant- métal et modification de la structure du matériau lors de l'injection du courant, influence de la température et du dopage sur les caractéristiques et sur le temps de réponse du matériau etc.). La modélisation des réponses de ces dispositifs à deux ou trois terminaux (en fonction du type de circuit, matériau, dimensions des dispositifs, etc.) est une étape essentielle pour envisager leur intégration dans des systèmes fonctionnant dans le domaine des radiofréquences jusqu'aux fréquences micro-ondes.

Les résultats présentés dans le chapitre 2 du manuscrit, nous permettent d'imaginer dans le futur proche d'utiliser les caractéristiques non-linéaires des commutateurs  $\text{VO}_2$  pour concevoir des oscillateurs (oscillateurs à rétroaction utilisant une résistance négative) des amplificateurs, des convertisseurs de fréquences ou des impédances négatives qui pourront être utilisées dans la conception des antennes etc. La simplicité de fabrication de ces composants est très avantageuse par rapport à d'autres technologies utilisées dans ces domaines d'applications. A un niveau plus fondamental, nous chercherons à comprendre et à exploiter les propriétés remarquables de ce matériau "actif" en combinaison hybride avec des matériaux "passifs" (multicouches, nano clusters incorporés dans une matrice diélectrique etc.). Le contrôle des nouvelles fonctionnalités électriques ou optiques de ces composites permettra le développement de dispositifs rapides et accordables (commutateurs, fonctions de filtrage, capteurs etc.) dans les domaines de l'optique, de la micro-électronique etc.

Une coopération a été initiée dans ce sens avec la centrale de nano caractérisation du CEA-LETI, et avec le laboratoire LAAS dans le but de produire des règles de conception de tels dispositifs. Par exemple, nous étudierons l'influence du dopage de nano agrégats et l'élaboration de structures multicouches pour obtenir des démonstrateurs fonctionnels. Cette thématique de recherche plus amont, et particulièrement originale en France, est menée en étroite collaboration avec les équipes du laboratoire matériaux SPCTS dans le cadre du labex  $\Sigma$ -LIM.

## DISPOSITIFS NEURO-MORPHIQUES INTEGRANT DES MATERIAUX NON-LINEAIRES POUR LES NOUVEAUX PARADIGMES DE COMMUNICATIONS

*Collaboration inter-départements XLIM : MINACOM/ DMI/ C2S2, et inter-laboratoires XLIM/ SPCTS (dans le cadre du labex  $\Sigma$ -LIM) et LAAS.*

*Support projet VIP-XLIM 2013 et PEPS-INSIS (CNRS) (« Dispositifs Neuromorphiques Actifs intégrant des matériaux non-linéaires à transition de Mott » 2013).*

Les systèmes actuels de transmission et de traitement de l'information sont basés sur des technologies à mémoires physiques qui approchent leurs limites technologiques à cause des lois d'échelle. Cette observation a donc conduit à l'émergence d'un sujet de recherche amont en étroite liaison avec le sujet présenté précédemment. Dans ce cadre, nous nous intéresserons aux architectures de calculs originales basées sur des logiques parallèles adaptatives ou bio-inspirées, en utilisant des mémoires qui peuvent apprendre, s'adapter et répondre à divers stimuli externes. Le domaine de recherche de la nanoélectronique adaptative intégrant des matériaux non-linéaires est fortement exploité actuellement car il permet de surpasser les limitations techniques et fondamentales liées à la loi d'échelle de Moore pour les circuits intégrés silicium, tout en favorisant l'émergence de nouveaux concepts de calculs neuro inspirés. Les « memristances » ou résistances à mémoire (commutateurs électriques non-linéaires type mémoire résistive non-volatile à l'échelle nanométrique) sont des composants émergents dont le comportement peut s'apparenter à celui de nano-synapses artificielles idéales et peuvent être vu comme des briques de base pour le développement de ce nouveau paradigme de calcul. La notion de memristance a été introduite de manière théorique dans les années 1970 (par L. Chua) comme un élément fondamental d'un circuit électrique (avec la résistance, l'inductance et la capacité) permettant de modéliser et d'uniformiser la représentation des dispositifs électriques fortement non-linéaires. C'est seulement en 2005 qu'une équipe de HP Labs a réussi à réaliser un dispositif nanométrique (à base d'une couche de  $\text{TiO}_x$  entre deux électrodes métalliques, en configuration matricielle cross-bar) ayant toutes les caractéristiques d'une memristance. Dans le même domaine de recherches, les premières études de systèmes bio-inspirés se sont concentrées sur la modélisation des neurones et la transposition de l'activité neuronale à l'aide de circuits électroniques simples. Un exemple compatible avec un grand nombre d'observations expérimentales en neurosciences, est l'oscillateur neuronal commandé en tension qui inclut notamment un dispositif à résistance différentielle négative (NDR).

Dans ce contexte scientifiquement riche, nous nous proposons l'étude et la réalisation de composants memristifs à base de matériaux diélectriques et/ou à transition de phase. Les composants envisagés seront réalisés au laboratoire en technologie planaire (type MIM ou métal-isolant-métal) en utilisant des matériaux innovants résistifs (type  $\text{ZnO}$ ,  $\text{NiO}$  etc.) et / ou à transition de phase, à corrélation électronique ( $\text{VO}_2$ ,  $\text{SmNiO}_3$  etc.). Nos principaux objectifs à moyen et long terme sont le développement et l'évaluation de plusieurs dispositifs innovants pertinents pour le domaine émergent de l'intelligence artificielle. Ils peuvent être synthétisés comme suit:

- La conception des matériaux intelligents et leur intégration pour la fabrication des memristances à l'échelle micro- et nanométrique, à base d'oxydes et matériaux à transition de phase (couches minces, nano-fils et composites - matériaux dopés avec des nano-agrégats métalliques, multicouches..).
- La conception et la fabrication de composants à mémoire ET actifs (micro- et nano-oscillateurs) basés sur des films de matériaux à transition de phase ( $\text{VO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SmNiO}_3$  etc.) présentant une résistance différentielle négative (NDR) dans leurs caractéristiques courant-tension (e.g. Figure 3.3).
- La réalisation et la modélisation des oscillateurs «à mémoire» à l'échelle micro- et nanométrique en intégrant des couches minces memristives (passifs) et des oscillateurs



(actifs) à base de matériaux à NDR. Un tel dispositif (combinant les deux caractéristiques : memristance et caractéristique NDR) fournira un comportement électrique riche et complexe.

- La démonstration des fonctions logiques simples type AND, XNOR à base de matrices de memristances et l'étude des propriétés synaptiques.
- La mise en évidence et la modélisation de fonctions neuronales en utilisant ces briques de base : mémoire à courte et longue durée, efficacité et plasticité synaptique etc.

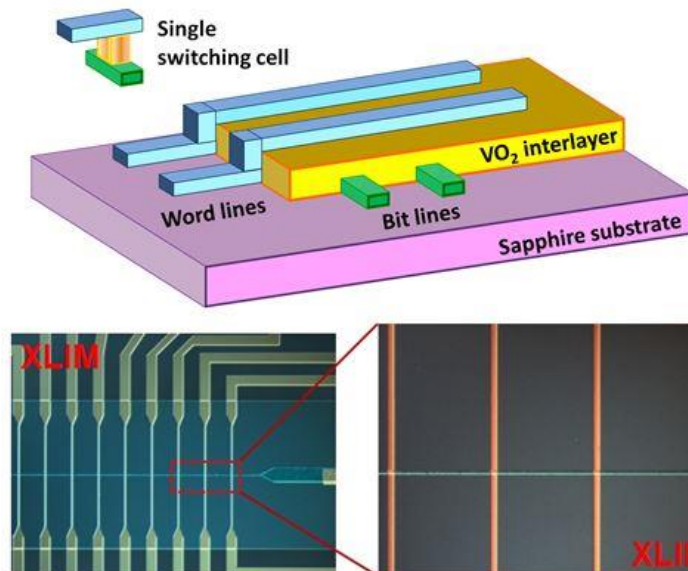


Figure 3.3. Schéma d'un réseau de composants MIM de type crossbars intégrant des matériaux à transition de phase et images obtenues par microscopie optique d'un tel réseau réalisé au laboratoire.

*Les types de commutateurs que nous proposons d'étudier sont perçus aujourd'hui comme des éléments à très fort potentiel pour les prochaines générations de mémoires non volatiles mais aussi pour assurer **des fonctions de télécommunications** (commutation, filtrage, déphasage...). Leurs caractéristiques et, potentiellement, leur grande fiabilité les rendent particulièrement attractives pour des applications logiques mais aussi analogiques, à faible consommation énergétique.*

Ce sujet de recherche s'intègre très bien avec les objectifs scientifiques à court et long terme du laboratoire XLIM et de son partenaire du Labex  $\Sigma$ -LIM (SPCTS) et est basé sur une collaboration de longue date dans des domaines comme les matériaux innovants, les micro- et nano- technologies pour des dispositifs avancés dans la micro-électronique, l'optique et les biotechnologies. Cette thématique requiert des compétences pluridisciplinaires, à l'interface de la nanoélectronique, de la physique des matériaux, de la conception et de la fabrication des circuits. Un aspect important, qui peut être abordé à travers une collaboration inter-départements déjà en place (MINACOM, C2S2, DMI-Mathématiques) est la simulation numérique du transport dans ces composants non-linéaires et le développement de modèles compacts pour leur intégration dans des simulateurs de type circuit.

## DISPOSITIFS INNOVANTS ACCORDABLES POUR L'OPTIQUE ET L'OPTIQUE INTEGREE A BASE DE MATERIAUX INTELLIGENTS

Cette activité se situe dans la continuité des recherches concernant les propriétés optiques des matériaux à transition de phase ( $\text{VO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{WO}_3$ ) et est menée en collaboration avec le laboratoire SPCTS et le département Photonique du laboratoire XLIM. Elle concerne la conception, la fabrication et la caractérisation de composants optiques (réseaux de Bragg, miroirs, filtres spectraux...) dont les caractéristiques spécifiques seront rendues accordables en intégrant lors de leur fabrication des matériaux dont l'indice de réfraction ou la réflectivité peut être modifiée. Ces composants pourront être rapidement introduits dans des systèmes optiques complexes (micro lasers,

lasers à fibre...) pour les rendre par exemple accordables en longueurs d'onde ou encore initier un fonctionnement impulsionnel. L'intérêt de notre approche réside dans les modifications ultra- rapides des propriétés optiques de ces matériaux (de la picoseconde à quelques centaines de femtosecondes) mais aussi dans les diverses types excitations externes pouvant induire ce changement : variation de la température, excitation optique, contraintes/ pression ou encore électrique par injection de porteurs.

A titre d'exemple, les changements de réflectivité et d'indice de réfraction d'un film  $\text{VO}_2$  entamant une transition MIT (induite optiquement ou par injection des porteurs) seront utilisés pour réaliser des micro- miroirs à réflectivité variable (commutateurs optiques rapides). Ceux-ci seront constitués d'un empilement de couches minces de type électrode transparente (ITO)/ film actif ( $\text{VO}_2$  ou  $\text{WO}_3$ )/ électrode transparente (ITO ou réseaux de nano-fils conducteurs) (Figure 3.4a). L'injection de porteurs à travers les électrodes transparentes (qui peuvent être aussi isolées de la couche active par un film mince diélectrique de type  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ou  $\text{SiO}_2$ ) permettra l'enclenchement rapide de la transition de phase du matériau actif à l'aide de tensions de commande faibles (estimées de 1 à 10 V).

En empilant alternativement une telle structure commandable ("active") avec une couche diélectrique ("passive", e.g.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) nous nous proposons de réaliser des composants plus complexes, de type réseaux de Bragg (Figure 3.4b), utilisables comme miroir de cavité laser. Le choix judicieux de l'épaisseur optique de chacun des deux éléments ( $\lambda/4$  où  $\lambda$  est la longueur d'onde d'émission laser) permettra la réalisation de miroirs de Bragg pour une longueur d'onde d'émission spécifique. Cette longueur d'onde de travail pourra être accordée quasi-continûment en fonction de la tension de commande puisqu'il est possible de modifier l'indice de réfraction et donc l'épaisseur optique de la couche active sur une large plage de valeurs en agissant sur la tension appliquée. Ce type de miroir est particulièrement intéressant pour la réalisation d'une source laser à fibre dopée erbium dont la longueur d'onde d'émission pourra être accordée sur une plage spectrale allant de 1530 à 1560 nanomètres.

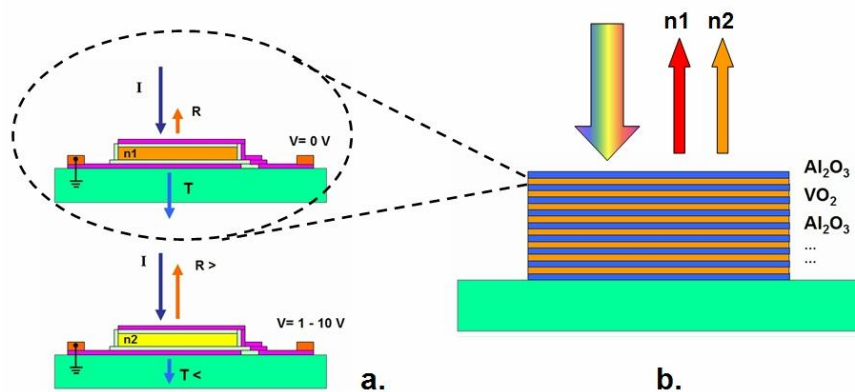


Figure 3.4. Conception d'un miroir à réflectivité variable à base de couches de  $\text{VO}_2$  ou de  $\text{WO}_3$  (a) et son intégration dans une structure complexe type miroir de Bragg (b) ( $n_1$  et  $n_2$  sont les indices de réfraction de la couche  $\text{VO}_2$  dans deux états différents –non- activé et activé).

Le concept innovant proposé, pourra améliorer les performances de ce type de dispositifs tout en ouvrant la voie à d'autres applications: commutateurs, réseaux de diffraction et déphaseurs optiques intégrés, modulateurs optiques pour le déclenchement d'impulsions lasers brèves en régime déclenché ou en régime de synchronisation des modes longitudinaux, réalisation de structures BIP plus complexes (2D), méta matériaux accordables etc.

Les recherches envisagées adressent des applications bien identifiées mais elles permettront également, à un niveau plus fondamental, de caractériser la transition de phase MIT des matériaux "actifs" ( $\text{VO}_2$  et  $\text{V}_2\text{O}_3$  etc.) en termes de rapidité, d'efficacité, en fonctions du design spécifique (dimensions critiques, épaisseurs etc.) et des divers facteurs d'excitation (température, excitation

optique, injection des porteurs). A un niveau beaucoup plus amont, le miroir de Bragg présenté ci-dessus, pourra être construit sur une membrane flexible en utilisant la technologie SOI (Silicon-on Insulator). Dans ce cas, la transition de phase des couches de VO<sub>2</sub> pourra être déclenchée par une pression extérieure. Si ce véhicule de test est intégré dans un système laser, on obtiendra ainsi, une modification de la longueur d'onde de l'émission et donc, un capteur de pression extrêmement sensible.

***L'utilisation de matériaux à transition de phase (ou, plus généralement, à propriétés optiques accordables) pourra être pertinente pour des applications civiles et militaires en tant que :***

- Commutateurs infrarouge (IR 1- 15  $\mu\text{m}$ ) rapides (activation électrique ou optique) dans des systèmes électro- optiques (*contre-mesure de protection, composants anti-réflexion, diminution de la rétro-réflexion*).
- Modification de la signature infrarouge (ou Discrétion Infra Rouge Adaptative (DIRA)) (*modification de la signature IR d'un objet en changeant significativement ses propriétés optiques dans de courts délais*).

## **GENERATION D'IMPULSIONS ULTRACOURTES DANS UNE CAVITE LASER EN UTILISANT DES ELEMENTS MOEMS. TECHNIQUES HYBRIDES AVEC DES ABSORBANTS SATURABLES.**

*Projet développé en collaboration avec le département Photonique de XLIM (V. Couderc)*

A la suite des travaux concernant le déclenchement actif des cavités à laser fibrées utilisant des modulateurs/ miroirs type MOEMS (présentés brièvement dans la partie bilan de ce rapport), nous avons démontré la possibilité de réaliser des systèmes lasers fonctionnant en régime de synchronisation des modes longitudinaux, permettant en théorie d'obtenir des fréquences de résonances élevées et des durées d'impulsions de l'ordre de quelques picosecondes.

L'architecture actuelle des systèmes laser étudiés génère des impulsions d'une récurrence d'environ 5 MHz mais plutôt longues (~1 ns) pour ce régime de fonctionnement. Néanmoins, nous avons pu montrer que la même cavité modulée par un modulateur acousto-optique présente des performances similaires. Nous avons fait également la démonstration expérimentale, de la capacité des composants MOEMS réalisés, à atteindre des fréquences de modulation de plusieurs mégahertz. ***Ceci laisse présager d'un fort potentiel pour la synchronisation des modes dans les sources lasers à impulsions plus courtes, dont l'optimisation devrait permettre d'approcher les standards pour ce type de source.*** La réduction de la longueur de cavité devrait permettre de faciliter la gestion de la dispersion totale mais nécessite la conception de micro-miroirs ayant des fréquences de résonances élevées. Ainsi, lorsque le redimensionnement des micro- miroirs (longueur et épaisseur de la membrane) ne permet plus d'atteindre les fréquences souhaitées, le *choix du matériau structural de l'élément MOEMS* reste le seul degré de liberté. Nous envisageons de remplacer celui-ci pour atteindre des fréquences de résonance mécaniques (liées au temps de commutation des composants obtenus) au moins 3 fois supérieures à celles d'un composant « classique » avec les mêmes dimensions. Une solution facilement concevable est d'utiliser le Si comme matériau structural pour les composants MOEMS, en utilisant par exemple la technologie SOI (substrats type Silicon-On-Insulator). En effet, le Si possède à la fois un module de Young deux fois plus élevé que celui de l'or (d'environ 150 GPa) et une masse volumique inférieure (2330 kg/m<sup>3</sup>).

Une autre solution possible pour optimiser la durée des impulsions est de faire appel à des techniques hybrides, ***en associant un modulateur actif de type MOEMS avec une technique passive (absorbants saturables tels des nanotubes de carbone (NTC), du graphène ou des matériaux à transition de phase)***. Les propriétés non linéaires des nanotubes de carbone et du graphène suscitent un intérêt grandissant depuis quelques années. En effet, ces matériaux disposent

d'une non-linéarité d'ordre 3 très forte, susceptible d'offrir un fort potentiel dans le domaine de la photonique, particulièrement en tant que modulateurs optiques ultrarapides. Le matériau absorbe volontiers les photons quelle que soit leur longueur d'onde. Mais si l'intensité lumineuse incidente devient suffisamment forte, les porteurs générés remplissent la bande de valence, empêchant une éventuelle excitation des électrons et permettant ainsi aux photons transmis de ne subir aucune perte. Tout ceci montre que les nouveaux matériaux type NTC et/ou graphène ainsi que les matériaux à transition MIT, peuvent être exploités en tant qu'absorbant saturable, sur une bande très large allant de l'ultraviolet au THz en passant par le visible et l'infrarouge. L'association avec la technologie MEMS permettra d'obtenir des impulsions ultra brèves (dont la durée est imposée par la cavité et le type d'absorbant) « à la demande », à une fréquence « commandée » par le modulateur type micro-miroir.

En conclusion, les activités de recherche que nous envisageons de poursuivre permettent d'introduire une activité scientifiquement très enrichissante dans le domaine des dispositifs micro- et nanoélectroniques par l'introduction de nouveaux concepts qui sont extrêmement stimulants, avec un fort potentiel applicatif. Ces thématiques requièrent des compétences pluridisciplinaires, à l'interface de la nanoélectronique, de la physique des matériaux, de la simulation multi-physique, de la conception et la fabrication des circuits, compétences qui se retrouvent pleinement au sein des activités du labex  $\Sigma$ -LIM. Les résultats obtenus dans le cadre de nos recherches devraient permettre d'élargir les champs d'investigation vers l'étude d'autres matériaux oxydes ou à transition de phase et d'identifier des nouveaux partenaires et collaborations pour la préparation de projets de recherche interdisciplinaires sur ces sujets émergents, à l'échelle nationale et européenne.

Fin

## Dr. Aurelian CRUNTEANU STANESCU

Chargé de recherche CNRS, CR1  
Institut de Recherche XLIM, UMR 7252, CNRS - Université de Limoges  
123 avenue Albert Thomas, 87060 LIMOGES Cedex FRANCE  
Tel: +33 (0) 5 87 50 67 41, Fax: +33 (0) 5 55 45 76 49  
aurelian.crunteanu@xlim.fr, www.xlim.fr



## LISTE DE PUBLICATIONS

- janvier 2014 -

A. Revues internationales à Comité de Lecture : **56 + 6 en cours de soumission**

B. Chapitres de livres : **5**

C. Brevets : **4**

D. Articles et/ou conférences invitées dans des congrès internationaux : **23**

E. Compte rendu de Congrès internationaux avec Comité de Lecture sur le texte complet : **122**

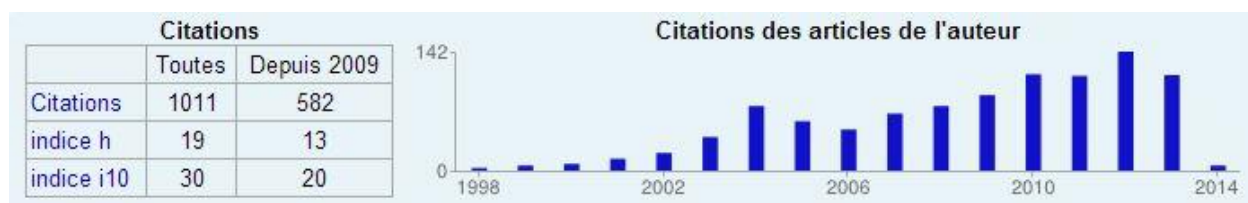
F. Compte rendu de Congrès nationaux avec Comité de Lecture sur le texte complet : **53**

G. Publications diverses : **7**

H. Vulgarisation scientifique : **4**

**h index= 17 (Scopus et ISI Web of Science)**

**Citations Google Scholar (02/01/2014)**



### A. Revues internationales à Comité de Lecture:

1. J.-C. Orlanges, **A. Crunteanu**, A. Pothier, T. Merle-Mejean, P. Blondy, C. Champeaux, "Titanium dioxide thin films deposited by pulsed laser deposition and integration in radio frequency devices: study of structure, optical and dielectric properties", Appl. Surf. Sci., **263**, pp. 111-114 (2012)
2. M. Fabert, A. Desfarges-Berthelemot, V. Kermène, and **A. Crunteanu**, "Temporal synchronization and spectral combining of pulses from fiber lasers Q-switched by independent MEMS micro-mirrors", Optics Express, Vol. 20, Issue 20, pp. 22895-22901 (2012), <http://dx.doi.org/10.1364/OE.20.022895>
3. J.-C. Orlanges, J. Leroy, **A. Crunteanu**, R. Mayet, P. Carles, and C. Champeaux, "Electrical and optical properties of vanadium dioxide containing gold nanoparticles deposited by pulsed laser deposition", Appl. Phys. Lett. **101**, 133102 (2012); <http://dx.doi.org/10.1063/1.4754708> (4 PAGES)
4. D. Bouyge, **A. Crunteanu**, M. Duran-Sindreu, A. Pothier, P. Blondy, J. Bonache, J.-C. Orlanges and F. Martin, "Reconfigurable split rings based on MEMS switches and their application to



- tunable filters", Journal of Optics, Special issue: Reconfigurable and Switchable Metamaterials, 14, 114001 (2012) (9pp), [doi:10.1088/2040-8978/14/11/114001](https://doi.org/10.1088/2040-8978/14/11/114001), invited paper.
5. J. Leroy, **A. Crunteanu**, A. Bessaoudou, F. Cosset, C. Champeaux, and J.-C. Orlianges, "High-speed metal-insulator transition in vanadium dioxide films induced by an electrical pulsed voltage over nano-gap electrodes", Appl. Phys. Lett. 100, 213507 (2012); <http://dx.doi.org/10.1063/1.4721520>
  6. V. Couderc, **A. Crunteanu**, M. Fabert, F. Doutre, F. El Bassri, D. Pagnoux, and A. Jalocha, "Picosecond pulse generation in a hybrid Qswitched laser source by using a microelectromechanical mirror", Optics Express 20(5) pp. 5524-5529, 2012.
  7. J. Leroy, A. Bessaoudou, F. Cosset, **A. Crunteanu**, "Structural, electrical and optical properties of thermochromic VO<sub>2</sub> thin films obtained by reactive electron beam evaporation", Thin Solid Films 520, pp. 4823-4825, (2012)
  8. J. Leroy, **A. Crunteanu**, J. Givernaud, J.-C. Orlianges, C. Champeaux, P. Blondy, "Generation of electrical self-oscillations in two-terminal switching devices based on the insulator-to-metal phase transition of VO<sub>2</sub> thin films", International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 4(01), pp. 101-107, 2012
  9. M. Fabert, V. Kermene, A. Desfarges-Berthelemot, P. Blondy, **A. Crunteanu**, "Actively mode-locked fiber laser using a deformable micromirror", Optics Letters 36, 2191, 2011
  10. D. Bouyge, D. Mardivirin, J. Bonache, **A. Crunteanu**, A. Pothier, M. Durán-Sindreu, P. Blondy, F. Martin, "Split Ring Resonators (SRRs) based on Micro-Electro-Mechanical Deflectable Cantilever-Type Rings: Application to Tunable Stopband Filters", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 21(5), pp. 243 – 245, may 2011
  11. **A. Crunteanu**, Julien Givernaud, J. Leroy, David Mardivirin, C. Champeaux, J.-C. Orlianges, Alain Catherinot and P. Blondy, "Voltage- and current-activated metal-insulator transition in VO<sub>2</sub>-based electrical switches: a lifetime operation analysis", Sci. Technol. Adv. Mater. **11** (2010) 065002 (6pp)
  12. J. Givernaud, **A. Crunteanu**, J.C. Orlianges, A. Pothier, C. Champeaux, A. Catherinot, P. Blondy, "Microwave power limiting devices based on the semiconductor metal transition in Vanadium dioxide thin films", *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, **58** (9), art. no. 5545454, pp. 2352-2361, (2010)
  13. A. Verger, A. Potheir, C. Guines, **A. Crunteanu**, P. Blondy, J.C. Orlianges, J. Dhennin, A Broue, F. Courtade and O. Vendier, "Sub-hundred nanosecond electrostatic actuated RF MEMS Switched capacitors", Journal of Micromechanics and Microengineering, **20** (2010) 064011 (7pp)
  14. M. Bousquet, J.-R. Duclère, C. Champeaux, A. Boule, P. Marchet, A. Catherinot, A. Wu, P. M. Vilarinho, S. Députier, M. Guilloux-Viry, **A. Crunteanu**, B. Gautier, D. Albertini, and C. Bachelet, "Macroscopic and nanoscale electrical properties of pulsed laser deposited (100) epitaxial lead-free Na<sub>0.5</sub>Bi<sub>0.5</sub>TiO<sub>3</sub> thin films", Journal of Applied Physics **107** (2010) 034102
  15. S. Courrèges, C. Thibon, F. Houndonougbo, **A. Crunteanu**, H. Jallageas, V. Madrangeas, M. Maignan, C. Laporte, C. Zanchi, "Tuning of Superconducting Filters with Laser Ablation Technique", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 19 (5), art. no. 5136200, pp. 3715-3721 (2009)
  16. D. Mardivirin, A. Pothier, **A. Crunteanu**, B. Vialle and P. Blondy, Charging in Dielectric Less Capacitive RF-MEMS Switches, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 57 (1), 231-236 (2009)
  17. F. Dumas-Bouchiat, C. Champeaux, A. Catherinot, J. Givernaud, **A. Crunteanu**, P. Blondy "RF Microwave Switches Based on Reversible Metal-Semiconductor Transition Properties of VO<sub>2</sub> Thin Films: An Attractive Way to Realise Simple RF Microelectronic Devices" in MATERIALS AND DEVICES FOR SMART SYSTEMS III Book Series: Materials Research Society Symposium Proceedings, Volume: 1129 pp. 275-286 (2009)
  18. M. Fabert, A. Desfarges-Berthelemot, V. Kermène, **A. Crunteanu**, D. Bouyge, and P. Blondy, "Ytterbium-doped fibre laser Q-switched by a cantilever-type micro-mirror," Opt. Express **16**, 22064-22071 (2008)

19. D. Bouyge, A. Crunteanu, V. Couderc, D. Sabourdy, P. Blondy, "Synchronized tunable Q-switched fiber lasers using deformable achromatic microelectromechanical mirror", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.20, n°12, pp.991-993 (2008)
20. D. Bouyge, C. Buy, A. Crunteanu, V. Couderc, P. Leproux, P. Blondy, "Discrete spectral selection and wavelength encoding from a visible continuum using optical MEMS", Journal of Micromechanics and Microengineering, 18, article no. 065010 (2008)
21. C. Palego, A. Pothier, A. Crunteanu, M. Chatras, P. Blondy, C. Champeaux, P. Tristant, A. Catherinot, "A 2-pole lumped element programmable filter with mems pseudo-digital capacitor banks", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 56 (3), art. 4453834, pp. 729-735 (2008)
22. F. Dumas-Bouchiat, C. Champeaux, A. Catherinot, **A. Crunteanu**, P. Blondy, "RF-Microwave switches based on reversible semiconductor-metal transition of V02 thin films synthesized by pulsed laser deposition", Applied Physics Letters, 91, pp.223505-1-3 (2007)
23. D. Bouyge, D. Sabourdy, **A. Crunteanu**, P. Blondy, V. Couderc, J. Lhermite, L. Grossard, A. Barthélemy, "Integration of micro-electro-mechanical deformable mirrors in doped fiber amplifiers", Microsystems Technologies, 13 (11-12), pp. 1607-1613 (2007)
24. Mohamad El Khatib, Arnaud Pothier, **A. Crunteanu** and P. Blondy, "A novel packaging approach for RF MEMS switching functions on alumina substrate", Journal of Microsystems Technologies, 13 (11-12), pp. 1457-1461 (2007)
25. **A. Crunteanu**, F. Dumas-Bouchiat, C. Champeaux, A. Catherinot, P. Blondy, "Electrical conduction mechanisms of metal nanoclusters embedded in an amorphous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> matrix", Thin Solid Films, 515 (16 SPEC. ISS.), pp. 6324-6327 (2007)
26. B. Lacroix, A. Pothier, **A. Crunteanu**, C. Cibert, F. Dumas-Bouchiat, C. Champeaux, A. Catherinot, P. Blondy, "Sub-microsecond RF MEMS switched capacitors", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 55 (6), pp. 1314-1320 (2007)
27. C. Palego, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Blondy, "High power reliability aspects on RF MEMS varactor design", Microelectronics Reliability, 46 (9-11), pp. 1705-1710 (2006)
28. D. Sabourdy, D. Bouyge, **A. Crunteanu**, P. Blondy, V. Couderc, J. Lhermite, V. Kermène, A. Desfarges-Berthelemot, L. Grossard, A. Barthélemy, M. Somekh, and D. Pureur, "Novel active Q-switched fiber laser based on electrostatically actuated micro-mirror system," Opt. Express **14**, 3917-3922 (2006)
29. **A. Crunteanu**, A. Pothier, P. Blondy, F. Dumas-Bouchiat, C. Champeaux, A. Catherinot, P. Tristant, O. Vendier, C. Drevo, J.L. Cazaux, L. Marchand, "Gamma radiation effects on RF MEMS capacitive switches", Microelectronics Reliability, 46 (9-11), pp. 1741-1746 (2006)
30. **A. Crunteanu**, D. Bouyge, D. Sabourdy, P. Blondy, V. Couderc, L. Grossard, P.H. Pioger, A. Barthélemy, "Deformable micro-electro-mechanical mirror integration in a fibre laser Q-switch system", Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 8 (7), pp. S347-S351 (2006)
31. David, B., Pizúrová, N., Schneeweiss, O., Bezdička, P., R. Alexandrescu, I. Morjan, **A. Crunteanu**, I. Voicu, "Magnetic properties of iron/graphite core-shell nanoparticles prepared by annealing of Fe-C-N-based nanocomposite", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 290-291 PART 1, pp. 179-182 (2005)
32. David, B., Pizúrová, N., Schneeweiss, O., Bezdička, P., R. Alexandrescu, I. Morjan, **A. Crunteanu**, I. Voicu, "Iron/graphite core-shell structured nanoparticles prepared by annealing of Fe-C-N composite", Physica Status Solidi C: Conferences, 1 (12), pp. 3418-3422. (2004)
33. David, B., Pizúrová, N., Schneeweiss, O., Bezdička, P., R. Alexandrescu, I. Morjan, **A. Crunteanu**, I. Voicu, "Magnetic properties of iron/graphite core-shell structured nanoparticles prepared by annealing of Fe-C-N nanocomposite", Czechoslovak Journal of Physics, 54 (SUPPL. 4), pp. D85-D88 (2004)
34. **A. Crunteanu**, Janchen, G., P. Hoffmann, M. Pollnau, Buchal, C., Petraru, A., Eason, R.W., Shepherd, D.F., "Three-dimensional structuring of sapphire by sequential He<sup>+</sup> ion-beam implantation and wet chemical etching", Applied Physics A: Materials Science and Processing, 76 (7), pp. 1109-1112 (2003)

35. **A. Crunteanu**, P. Hoffmann, M. Pollnau, Buchal, Ch., "Comparative study on methods to structure sapphire", *Applied Surface Science*, 208-209 (1), pp. 322-326 (2003)
36. Grivas, C., Shepherd, D.P., May-Smith, T.C., Eason, R.W., M. Pollnau, **A. Crunteanu**, Jelinek, M., "Performance of Ar+-milled Ti:sapphire rib waveguides as single transverse-mode broadband fluorescence sources", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 39 (3), pp. 501-507 (2003)
37. R. Alexandrescu, **A. Crunteanu**, Morjan, R.-E., I. Morjan, Rohmund, F., Falk, L.K.L., Ledoux, G., Huisken, F., "Synthesis of carbon nanotubes by CO<sub>2</sub>-laser-assisted chemical vapour deposition" *Infrared Physics and Technology*, 44 (1), pp. 43-50. (2003)
38. I. Morjan, R. Alexandrescu, Soare, I., Dumitrache, F., Sandu, I., I. Voicu, **A. Crunteanu**, Vasile, E., Ciupina, V., Martelli, S., "Nanoscale powders of different iron oxide phases prepared by continuous laser irradiation of iron pentacarbonyl-containing gas precursors", *Materials Science and Engineering C*, 23 (1-2), pp. 211-216 (2003)
39. **A. Crunteanu**, M. Pollnau, Jänchen, G., Hibert, C., P. Hoffmann, Salathé, R.P., Eason, R.W., Grivas, C., Shepherd, D.P., "Ti:sapphire rib channel waveguide fabricated by reactive ion etching of a planar waveguide", *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 75 (1), pp. 15-17 (2002)
40. Hofmeister, H., Huisken, F., Kohn, B., R. Alexandrescu, Cojocaru, S., **A. Crunteanu**, I. Morjan, Diamandescu, L., "Filamentary iron nanostructures from laser-induced pyrolysis of iron pentacarbonyl and ethylene mixtures", *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 72 (1), pp. 7-11 (2001)
41. **A. Crunteanu**, Charbonnier, M., Romand, M., Mugnier, J., Sandu, C., "Optical and morphological properties of laser photo-deposited hydrogenated CN<sub>x</sub> thin films", *Applied Surface Science*, 168 (1-4), pp. 48-51 (2000)
42. **A. Crunteanu**, Charbonnier, M., Romand, M., Mugnier, J., R. Alexandrescu, Negoita, F., Pantelica, D. "Structural and vibrational characterization of hydrogenated carbon nitride thin films obtained by laser-induced CVD", *Applied Surface Science*, 168 (1-4), pp. 44-47 (2000)
43. **A. Crunteanu**, Charbonnier, M., Romand, M., Vasiliu, F., Pantelica, D., Negoita, F., R. Alexandrescu, "Synthesis and characterization of carbon nitride thin films obtained by laser induced chemical vapour deposition", *Surface and Coatings Technology*, 125 (1-3), pp. 301-307 (2000)
44. **A. Crunteanu**, Charbonnier, M., Romand, M., R. Alexandrescu, "UV laser photodeposition of carbon nitride thin films from gaseous precursors", *Applied Surface Science*, 154, pp. 393-398. (2000)
45. S. Martelli, Mancini, A., Giorgi, R., R. Alexandrescu, Cojocaru, S., **A. Crunteanu**, I. Voicu, Balu, M., I. Morjan, "Production of iron-oxide nanoparticles by laser-induced pyrolysis of gaseous precursors", *Applied Surface Science*, 154, pp. 353-359. (2000)
46. Huisken, F., Kohn, B., R. Alexandrescu, Cojocaru, S., **A. Crunteanu**, Ledoux, G., Reynaud, C., "Silicon carbide nanoparticles produced by CO<sub>2</sub> laser pyrolysis of SiH<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> gas mixtures in a flow reactor", *Journal of Nanoparticle Research*, 1 (2), pp. 293-303. (1999)
47. **A. Crunteanu**, R. Alexandrescu, S. Cojocaru, M. Charbonnier, M. Romand, F. Vasiliu, "Synthesis and characterization of CN thin films by IR laser deposition in a flow reactor", *Journal De Physique. IV : JP*, 9 I (8), pp. Pr8-419-Pr8-424. (1999)
48. R. Alexandrescu, S. Cojocaru, **A. Crunteanu**, I. Morjan, I. Voicu, F. Vasiliu, L. Diamandescu, B. Kohn, F. Huisken "Preparation of iron carbide and iron nanoparticles by laser-induced gas phase pyrolysis" *JOURNAL DE PHYSIQUE. IV : JP*, 09 PR (8), Pages Pr8-537 - Pr8-544 (1999)
49. R. Alexandrescu, Cireasa, R., Cojocaru, C.S., **A. Crunteanu**, I. Morjan, Vasiliu, F., Kumar, A., "Carbon nitride thin films and nanopowders produced by CO<sub>2</sub> laser pyrolysis", *Surface Engineering*, 15 (3), pp. 230-234 (1999)
50. Cireasa, R., **A. Crunteanu**, R. Alexandrescu, I. Morjan, Martin, C., Mihailescu, I.N., Oncioiu, G., "Influence of process parameters on CN<sub>x</sub> films obtained by laser-CVD at two wavelengths", *Carbon*, 36 (5-6), pp. 775-780. (1998)

51. R. Alexandrescu, Cojocaru, S., **A. Crunteanu**, Petcu, S., Cireasa, R., I. Voicu, I. Morjan, Fatu, D., Huisken, F., "Laser pyrolysis of carbon-nitrogen gas-phase compounds: An attempted approach to carbon nitride formation", *Carbon*, 36 (5-6), pp. 795-800. (1998)
52. R. Alexandrescu, I. Morjan, **A. Crunteanu**, Cojocaru, S., Petcu, S., Teodorescu, V., Huisken, F., Kohn, B., Ehbrecht, M., "Iron-oxide-based nanoparticles produced by pulsed infrared laser pyrolysis of Fe(CO)<sub>5</sub>", *Materials Chemistry and Physics*, 55 (2), pp. 115-121. (1998)
53. **A. Crunteanu**, Cireasa, R., R. Alexandrescu, I. Morjan, Nelea, V., Mihailescu, I.N, Andrei A., Vasiliu F, "Influence of the surface treatment of the substrate in the LCVD of CN<sub>x</sub> films", *Surface and Coatings Technology*, 100- (1-3), pp. 173-179. (1998)
54. R. Alexandrescu, Huisken, F., Pugna, G., **A. Crunteanu**, Petcu, S., Cojocaru, S., Cireasa, R., I. Morjan, "Preparation of carbon nitride fine powder by laser induced gas-phase reactions", *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 65 (2), pp. 207-213. (1997)
55. R. Alexandrescu, I. Morjan, I. Voicu, Pugna, G., Petcu, S., **A. Crunteanu**, Popescu, C., Fatu, D., "Cu-Ni oxides obtained by laser and thermal processing of mixed salts", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 30 (18), pp. 2620-2625. (1997)
56. R. Alexandrescu, R. Cireasa, G. Pugna, **A. Crunteanu**, S. Petcu, I. Morjan, Mihailescu, I.N, A. Andrei  
"CN<sub>x</sub> thin films obtained by laser induced CVD in different gas-substrate systems", *Applied Surface Science*, 109-110, pp. 544-548. (1997)

## B. Chapitres de livres:

57. **A. Crunteanu**, J. Givernaud, P. Blondy, J.-C. Orlanges, C. Champeaux and Alain Catherinot, "Exploiting the semiconductor-metal phase transition of VO<sub>2</sub> materials: a novel direction towards tuneable devices and systems for RF-microwave applications", in *Advanced Microwave and Millimeter Wave Technologies Semiconductor Devices Circuits and Systems*, Moumita Mukherjee (Ed.), ISBN: 978-953-307-031-5, INTECH, (2010)
58. L. Laversenne, **A. Crunteanu**, P. Hoffmann, M. Pollnau, Moretti, P., Mugnier, J., "Sapphire planar waveguides fabricated by H<sup>+</sup> ion beam implantation", *OSA Trends in Optics and Photonics Series*, 88, pp. 1785-1787 (2003)
59. **A. Crunteanu**, G. Jänchen, R.P. Salathé, P. Hoffmann, M. Pollnau, R.W. Eason, and D.P. Shepherd, "Ti:sapphire rib channel waveguide fabricated by reactive ion etching of a planar waveguide", *OSA Trends in Optics and Photonics*, Vol. 73 (Optical Society of America, Washington, DC 2002), p. 265, paper CTuP5 (2002).
60. R. Alexandrescu, **A. Crunteanu**, Cireasa, R., Cojocaru, S., I. Morjan, Kumar, A., "Carbon nitride thin films synthesized from the gas-phase by laser-induced reactions: A parametric study" in **Hard Coatings Based on Borides, Carbides and Nitrides**, Eds. A. Kumar, Y. W. Chung, R.W. Chia, The Minerals, Metals and Materials Soc., TMS Annual Meeting, pp. 73-88. (1998)
61. R. Alexandrescu, C. S. Cojocaru, **A. Crunteanu**, I. Morjan, I. Voicu, F. Huisken, B. Kohn, F. Vasiliu, D. Fatu, "Synthesis of Iron-Carbide-based Nanopowders by Laser Photoinduced Reactions from Gaseous Precursors" in **Surface Modification Technologies XII**, Eds. T. S. Sudarshan, K. A. Khor, M. Jeandin, (ASM International, Materials Park Ohio) (1998).

## C. Brevets:

62. D. Bouyge, C. Lesvigne, V. Couderc, **A. Crunteanu**, P. Leproux, L. Lefort, "Procédé et dispositif de caractérisation d'éléments microscopiques" Brevet France 0707098 du 10/10/2007,
  - Extension aux pays PCT sous le titre: « Method and device for characterizing microscopic elements », WO2009/087287 du 16.07.2009
  - Brevet USA USPTO 01/04/2011
  - Demande d'extension au Japon en cours sous le titre "Method and device for characterizing microscopic elements" le 09/04/2013
63. R. Alexandrescu, R. Cireasa, **A. Crunteanu**, G. Pugna, S. Petcu, I. Morjan, "Method for laser preparation of CN<sub>x</sub>-type carbon nitride thin films", Romania Patent No. 113231/1998.



64. R. Alexandrescu, G. Pugna, **A. Crunteanu**, S. Petcu, R. Cireasa, I. Morjan, D.C. Dumitras "Method for laser preparation of ultrafine crystalline carbon-nitride powder" Romanian Patent No. C/1999/17.10.1996.
65. I. Voicu, R. Alexandrescu, G. Pugna, S. Petcu, I. Morjan, **A. Crunteanu**, C. Popescu, D. Fatu, "Method for obtaining of mixed Cu-Ni and Cu-Mn oxides", Romanian Patent No. 113232/1998.

#### **D. Articles et/ou conférences invitées (pléniers ou thématiques) dans des congrès internationaux:**

66. **A. Crunteanu**, J. Leroy, D. Bouyge, G. Humbert, P. Blondy, J.-C. Orlanges, C. Champeaux ; "Métamatériaux accordables pour les micro-ondes et le THz : intégration hybride avec des composants MEMS et matériaux à transition de phase ; Colloque National Métamatériaux (CNM 2013), Orsay, 7-8 Octobre 2013, conférence invitée
67. J.-C. Orlanges, R. Zaabi, C. Champeaux, F. Dumas Bouchiat, P. Carles, R. Mayet, E. Laborde, J. Leroy, **A. Crunteanu** ; "Oxide thin films containing metal nanoparticles : monitoring the physical properties" ; 2013 Energy Materials Nanotechnology (EMN Spring), Walt Disney World Swan and Dolphin, Orlando FL, USA, April 8 - 11, 2013 , conférence invitée.
68. P. Blondy, **A. Crunteanu**, A. Pothier, G. Neveu, M. Dussaubay, W. Rebernak, E. Gatard, T. Gasseling, "Applications of micro and nano technologies to reconfigurable microwave components", The Asia Pacific Microwave Conference – APMC 2011, Melbourne, Victoria, Australia, 5-8 December 2011, présentation invitée – TU1D-01 (article number 6173684,p 57-59)
69. **A. Crunteanu**, J.-C. Orlanges, J. Leroy, J. Givernaud, C. Champeaux, V. Madrangeas, P. Blondy, "Dispositifs et systèmes accordables pour la microélectronique et l'optique en exploitant les propriétés fortement non-linéaires des matériaux à transition de phase isolant-métal », Le deuxième colloque francophone PLUridisciplinaire sur les Matériaux, l'Environnement et l'Electronique (PLUMEE 2011) , Limoges (France) 30 Mai -1 Juin 2011, Présentation invitée – 1INV
70. P. Blondy, D. Mardivirin, F. Barriere, A. Pothier, **A. Crunteanu**, C. Guines, "Ultra linear MEMS switched capacitor arrays" 41nd European Microwave Conference, Workshop on Applications of RF-MEMS, Manchester, Oct.2011
71. C. Champeaux, A. Catherinot, J.-C. Orlanges and **A. Crunteanu**, "Optical and telecom thin films deposited by laser ablation", Conference invitée a CIMTEC 2010, 12th International Ceramics Congress, June 6-11, Montecatini Term, Italie, 2010
72. C. Champeaux, F. Dumas-Bouchiat, A. Catherinot, J.-C. Orlanges, **A. Crunteanu**, "Clusters and nanostructured thin films created by laser ablation", Conference invitée a HPLA High Power Laser Applications, 18-22 April 2010, San Diego USA, 2010
73. C. Champeaux, A. Catherinot, J.-C. Orlanges and **A. Crunteanu**, "Laser ablation: a way to synthesize clusters and nanostructured thin films", Conference invitée a ITFPC'09, November 17-20, Nancy, France, 2009
74. A. Pothier, P. Blondy, D. Mardivirin, **A. Crunteanu**, «Reliability of Dielectric Less RF-MEMS Switches» at *Advances in RF-MEMS Reliability Workshop, 39nd European Microwave Conference (EuMC)*, internationale, Rome, Italie, 28/09-02/10/ 2009
75. P. Blondy, R. Stéfani, S. Courrèges, A. Pothier, J.C. Orlanges, **A. Crunteanu**, M. Chatras, "Development of Reliable and High Power MEMS Varactors", NATO Workshop "Advanced Materials and Technologies for Micro/Nano-Devices, Sensors and Actuators" June 29 - July 2, St Petersburg, Russia (2009)
76. C. Champeaux, F. Dumas-Bouchiat, A. Catherinot, J. Givernaud, J.-C. Orlanges and **A. Crunteanu**, "Clusters and nanostructured thin films by laser ablation for telecom or optic applications", E-MRS Spring Meeting 2009, Symposium Q: "Laser and plasma processing for advanced materials", Strasbourg, France, 8-12 June 2009
77. F. Dumas-Bouchiat, C. Champeaux, A. Catherinot, J. Givernaud, **A. Crunteanu** and P. Blondy, "RF Microwave Switches Based On Reversible Metal-Semiconductor Transition Properties of VO2 Thin Films: An Attractive Way to Realise Simple RF Microelectronic Devices", Material Research Society MRS Fall Meeting, Symposium V: Materials, Devices, and Characterization for Smart Systems, December 1 - 5, Boston, MA, USA, 2008



78. P. Blondy, A. Pothier, D. Mardivirin, **A. Crunteanu**, "Dielectric less capacitive switches for RF and microwave applications", MEMSWAVE 2008, 9<sup>th</sup> International Symposium on RF-MEMS and RF Microsystems, Crète, Grèce, 30 Juin – 3 Juillet 2008
79. V. Couderc, D. Bouyge, A. Crunteanu, P. Leproux, P. Blondy, M. Okuno, H. Kano, "Continuum source and adaptive spectral selection for non linear imaging system and fluorescence analysis", OSC 2008 - Second International Conference on Optical Complex Systems, Cannes, France, 17-19 Mars 2008, Papier Invité
80. P. Blondy, A. Pothier, A. Crunteanu, "Performances and reliability of dielectric less capacitive MEMS Switches", ESA Round Table on Micro and Nano Technology, Noordwijk, The Netherlands, 8-12 Octobre 2007, Présentation Invitée
81. **A. Crunteanu**, D. Bouyge, D. Sabourdy, V. Couderc, P. Blondy, A. Barthelemy, "Recent developments on MOEMS-type micro mirrors integration with laser systems for short pulse generation and wavelength selectivity", Workshop MOEMS in Space, CNES CCT-MCE-OOE, Toulouse, 10 mai 2007
82. P. Blondy, A. Pothier, **A. Crunteanu**, D. Mercier, "RF-MEMS for Millimeter Waves", 4th ESA Workshop on Millimeter Wave Technology and Applications; The 8th Topical Symposium on Millimeter Waves - TSMW2006, The 7th MINT Millimeter-Wave International Symposium - MINT-MIS2006, Espoo, Finland, February 15-17, 2006
83. **A. Crunteanu**, P. Blondy, C. Champeaux, A. Catherinot, P. Tristant, O. Vendier, J. L. Cazaux, L. Marchand, "Charging effects of dielectric materials for RF MEMS capacitive switches", PATENT-AMICON – WORKSHOP "MEMS reliability", 16th European Symposium on Reliability of Electron Devices - ESREF 2005, Arcachon/ Bordeaux France, 10-14 octobre 2005
84. S. Avrillon, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Blondy, "Two state MEMS varactors and application to a switched beam reflect array", Workshop RF MEMS for antennas au IEEE Antennae and Propagation Symposium, Washington DC, July 2005
85. **A. Crunteanu**, P. Blondy, S. Verdeyme, V. Couderc, A. Barthelemy, C. Champeau, A. Catherinot, P. Tristant, "Optical MEMS for miniature laser oscillator", ESA's Microphotonics Technology Day, Noordwijk, The Netherlands, March 2004
86. L. Laversenne, **A. Crunteanu**, M. Pollnau, "Novel broadband luminescent light sources for interferometry", International Conference on Luminescence and its Applications, Bombay, India, février 2004
87. R. Alexandrescu, **A. Crunteanu**, I. Morjan, R. Morjan, I. Voicu, F. Huisken, F. Rohmund, "The catalysed growth of carbon nanotubes in the laser-assisted chemical vapor deposition processes", IUVESTA Workshop on Nanoparticles, Stratford-upon-Avon, UK, July 8th – 12th, 2001
88. R. Alexandrescu, S. Cojocaru, **A. Crunteanu**, I. Morjan, I. Voicu, L. Diamandescu, F. Vasiliu, F. Huisken, B. Kohn, "Preparation of iron carbide and iron nanoparticles by laser - induced gas phase pyrolysis", European Conference on Chemical Vapor Deposition EUROCVT 12, Sitges (Barcelona), Spain, 27 September 1999

#### **E. Compte rendu de Congrès internationaux avec Comité de Lecture sur le texte complet:**

89. J. Leroy, **A. Crunteanu**, G. Humbert, J.-C. Orlianges, C. Champeaux, P. Blondy ; "Design and Characterization of Active THz Metamaterials based on Metal-Insulator Transition of VO<sub>2</sub> Patterns" ; 7th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics – Metamaterials 2013, Bordeaux, France, 16-21 September, (2013).
90. D. Férachou, G. Humbert, A. O. Hamouda, J.M. le Floch, **A. Crunteanu**, M. E. Tobar, D. Cros, J.M. Blondy, „Easily scalable resonator based on hollow-core photonic band gap crystal cladding for extremely high frequencies“, 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves IRMMW-THz 2013, Mainz, Germany, September 1 - 6, 2013
91. **A. Crunteanu**, E. Lemoine, J. Leroy, D. Passerieux, P. Leveque, P. Blondy, C. Gaquiere, D. Ducatteau, J.-C. Orlianges, C. Champeaux; "Pulsed power operation of power limiters integrating a phase transition material"; IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2-7 June 2013 Seattle, WA, USA

92. J. Leroy, V. Madrangeas, **A. Crunteanu**, G. Humbert, D. Passerieux, J.-C. Orlianges, C. Champeaux, P. Blondy, « Etude de la transition isolant-métal du dioxyde de vanadium du DC aux fréquences THz », Le troisième colloque francophone PLUridisciplinaire sur les Matériaux, l'Environnement et l'Electronique, PLUMEE 2013, 22 - 25 Mai, 2013, Bacau, Roumanie.papier 2B-11
93. J.-C. Orlianges, R. Zaabi, C. Champeaux, **A. Crunteanu**, « Spectroscopic Ellipsometry Study of Metal to Insulator Transition in Vanadium Dioxide Thin Films », 2013 Materials Research Society, MRS Spring Meeting, April 1-5, 2013, San Francisco, CA, USA
94. H. Dardar, J.-R. Duclere, P. Thomas, V. Couderc, **A. Crunteanu**, "Elaboration of new TeO<sub>2</sub>-based transparent glass-ceramics", International Symposium on Non-Oxide and New Optical Glasses, IS(NOG)2 2012, July 1-5, 2012, St Malo, France, poster-P36
95. C. Guines, **A. Crunteanu**, M. Chatras, A. Pothier, P. Blondy, "A Quasi Bistable RF-MEMS Switched Capacitor", IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 17–22 June 2012, Montréal, Québec, Canada, oral presentation, paper TH2F-3
96. **A. Crunteanu**, J. Leroy, G. Humbert, D. Ferachou, J. Orlianges, C. Champeaux, P. Blondy, "Tunable Terahertz Metamaterials based on Metal-Insulator Phase Transition of VO<sub>2</sub> Layers", IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 17–22 June 2012, Montréal, Québec, Canada, oral presentation, paperTH2C-4
97. J.-C. Orlianges, **A. Crunteanu**, A. Pothier, T. Merle-Mejean, P. Blondy, C. Champeaux, "Integration of titanium dioxide thin films deposited by PLD in RF and microwave MEMS: study of structure and dielectric properties", European Material Research Society (E-MRS) Spring Meeting, Congress Center - Strasbourg, France, 14-18 mai 2012, paper P1.43, poster presentation
98. P. Dutheil, J.- C. Orlianges, **A. Crunteanu**, C. Champeaux, A. Roemer, and A. Catherinot, "AlN and ZnO thin films deposited by Pulsed Laser Deposition (PLD) for surface acoustic wave devices", European Material Research Society (E-MRS) Spring Meeting, Congress Center - Strasbourg, France, 14-18 mai 2012, paper P1.50, poster presentation
99. F. Cosset, **A. Crunteanu**, A. Bessaudou, J. Leroy "High-speed Mott-transition switches based on VO<sub>2</sub> layers" European Material Research Society (E-MRS) Spring Meeting, Congress Center - Strasbourg, France, 14-18 mai 2012, oral presentation
100. **A. Crunteanu**, J. Leroy, F. Cosset, A. Bessaudou, J.C. Orlianges, C. Champeaux, "Electrical self-oscillations across two end three-terminal resistive switches based on VO<sub>2</sub> layers integrated in crossbar circuits" MRS Spring Meeting, 9-13 April 2012, San Francisco, California, USA, Session E6: Resistive Memory, poster E6.11, 2012
101. J. Gauvin, F. Barriere, D. Mardivirin, A. Pothier, O. Vendier, J.-L. Cazaux, **A. Crunteanu**, P. Blondy, "*Design, Fabrication and Measurements of Reliable Low Voltage RF-MEMS Switched Varactors*", EuMW 2011, Manchester European Microwave Week 2011, Manchester Central, Manchester, UK, 9th - 14th October 2011, EuMIC Poster 02-28
102. D. Mardivirin, F. Barrière, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Blondy, "*A 2 Pole 9.6-11.7 GHz Band Stop Filter Using Analog Tuning RF MEMS Varactors*", EuMW 2011, Manchester European Microwave Week 2011, Manchester Central, Manchester, UK, 9th - 14th October 2011, présentation orale, EuMC/EuMIC02-4
103. F. Barriere, A. Pothier, **A. Crunteanu**, M. Chatras, P. Blondy, "*A Zero-Level Packaged RF-MEMS Switch with Large Contact Force*", EuMW 2011, Manchester European Microwave Week 2011, Manchester Central, Manchester, UK, 9th - 14th October 2011, présentation orale, EuMC/EuMIC10-2
104. J. Leroy, A. Bessaudou, F. Cosset, **A. Crunteanu**, "*Electrical and optical properties of Vanadium Dioxide thin films obtained by reactive electron beam evaporation*", European Material Research Society (E-MRS), Spring & Bilateral Meeting, Symposium D, "Synthesis, Processing and Characterization of Nanoscale Multi Functional Oxide Films III", Nice, France, 9-13 Mai 2011, poster presentation
105. D. Mardivirin, F. Barriere, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Blondy, "*An Analogically Tuned Capacitor with RF MEMS Structure*", MEMSWAVE 2011, 12th International Symposium on RF MEMS and RF Microsystems, Athens, Greece, 27-29 Juin 2011, oral presentation

106. A. Verger, A. Pothier, C. Guines, A. Crunteanu, P. Blond, J.-C. Orlianges, J. Dhennin, F. Courtade, O. Vendier, "*Design of ohmic miniature MEMS components for fast reconfiguration*", MEMSWAVE 2011, 12th International Symposium on RF MEMS and RF Microsystems, Athens, Greece, 27-29 Jun 2011, présentation orale
107. D. Mardivirin, F. Barriere, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Blondy, "*9.6-11.7 GHz Analogically Tuned Band Stop Filter based on RF-MEMS Varactors*", MEMSWAVE 2011, 12th International Symposium on RF MEMS and RF Microsystems, Athens, Greece, 27-29 Jun 2011, présentation orale
108. M. Mohamed, R. Costes, F. Houndonougbo, D. Passerieux, **A. Crunteanu**, V. Madrangeas, D. Cros, M. Pate, J.-P. Ganne, "*Microwave Phase Shifter Based On Ferroelectric Tunable Interdigitated Capacitors*", EMF2011, European Meeting on Ferroelectricity, Bordeaux, June 26 - July 2, 2011, présentation poster
109. **A. Crunteanu**, J. Leroy, J.-C. Orlianges, C. Champeaux, A. Catherinot, P. Blondy, "*Current-driven Self-oscillations in Two-terminals Resistive Switches Induced by the Metal-insulator Transition in VO<sub>2</sub> Thin Films*", ICMAT-2011, Symposium A: Nanostructured Oxides, Interfaces, Heterostructures and Devices, SUNTEC Singapore, 26 June - 1 July, 2011, Présentation orale
110. J.-C. Orlianges, **A. Crunteanu**, J. Leroy, C. Champeaux, P. Blondy, A. Catherinot, "*Structural, Electrical and Optical Properties of Au- Doped Vo<sub>2</sub> Thin Films Performing a Metal-insulator Transition*" ICMAT-2011, Symposium A: Nanostructured Oxides, Interfaces, Heterostructures and Devices, SUNTEC Singapore, 26 June - 1 July, 2011, présentation orale
111. F. Houndonougbo, R. Costes, J. Fan, **A. Crunteanu**, V. Madrangeas, D. Cros, M. Pate, J.P. Ganne, P. Monteil, "*A 380-420 MHz Two Pole tunable filter using new ferroelectric composite capacitors*", EuMW 2010, European Microwave Week, Paris, France, 26 septembre – 1er octobre 2010
112. D. Mardivirin, S. Courreges, **A. Crunteanu**, A. Pothier, P. Blondy, F. Coccetti, R. Plana, "*Evidence of Successive Fowler-Nordheim and Frenkel-Poole Conductions in Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Based RF-MEMS Capacitive Switches*", EuMW 2010, European Microwave Week, Paris, France, 26 septembre – 1er octobre 2010
113. D. Bouyge, **A. Crunteanu**, O. Massague, J.C. Orlianges, C. Champeaux, A. Cathierinot, A. Velez, J. Bonache, F. Martin, P. Blondy, "*Applications of Vanadium Dioxide (VO<sub>2</sub>)-loaded Electrically Small Resonators in the Design of Tunable Filters*", EuMW 2010, European Microwave Week, Paris, France, 26 septembre – 1er octobre 2010
114. A. Verger, A. Pothier, C. Guines, **A. Crunteanu**, P. Blondy, J.C. Orlianges, J. Dhennin, F. Courtade, O. Vendier, "*Miniature RF MEMS Switches with 50 ns Switching Speed*", 11<sup>th</sup> International Symposium on RF Microsystems, MEMSWAVE 2010, Otranto, Italy, 28 juin-1er juillet 2010
115. F. Doutre, **A. Crunteanu**, V. Couderc, D. Pagnoux "Picosecond Pulse Generation in a Q-Switched Laser By Using A Micro-Opto-Electromechanical Mirror", 14th International Conference "Laser Optics 2010", St.Petersburg, Russia, June 28 - July 02, 2010, WeR1-p78, Poster presentation
116. P. Duthail, C. Champeaux, G. Trolliard, J.C. Orlianges, M. Chatras, **A. Crunteanu**, A. Catherinot, « AIN thin films deposited by pulsed laser deposition (PLD) for microelectronic devices », EMRS Spring Meeting, Symposium R : Laser processing and diagnostics for micro and nano applications, Congress Center, Strasbourg, France, June 7-11, 2010
117. D. Bouyge, **A. Crunteanu**, A. Pothier, P.O. Martin, P. Blondy, A. Velez, J. Bonache, J.C. Orlianges, F. Martin, "*Reconfigurable 4 Pole Bandstop Filter based on RF-MEMS-loaded Split Ring Resonators*", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, IMS 2010, Anaheim, Californie, USA, 23-28 mai 2010
118. A. Verger, A. Pothier, C. Guines, **A. Crunteanu**, P. Blondy, J.C. Orlianges, J. Dhennin, F. Courtade, O. Vendier, "*Sub-Hundred nanosecond reconfiguration capabilities of Nanogap RF MEMS Switched capacitor*", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, IMS 2010, Anaheim, Californie, USA, 23-28 mai 2010
119. **A. Crunteanu**, M. Fabert, J. Givernaud, V. Kermene, A. Desfarges-Berthelemot, J.C. Orlianges, C. Champeaux, A. Catherinot, "*Vis-IR Optical switching modulation based on the electrically*

- activated phase transition of VO<sub>2</sub> thin films*", Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) and the Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS) (Optical Society of America, Washington DC, 2010), San Jose, CA, USA, presentation number JWA88, May 16-21, 2010
120. F. Barriere, **A. Crunteanu**, A. Pothier, M. Chatras, P. Blondy, "A low value normally on RF-MEMS switched capacitor for high Q millimeter wave tuning", 10<sup>th</sup> IEEE Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF-Systems, New Orleans, LA, 11-13 janvier 2010
  121. F. Barriere, **A. Crunteanu**, A. Bessaudou, A. Pothier, F. Cosset, D. Mardivirin, P. Blondy, "Zero level metal thin film package for RF MEMS", 10<sup>th</sup> IEEE Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF-Systems, New Orleans, LA, 11-13 janvier 2010
  122. D. Bouyge, **A. Crunteanu**, J.-C. Orlanges, D. Passerieux, C. Champeaux, A. Catherinot, Adolfo Velez, Jordi Bonache, Ferran Martin, P. Blondy, "Reconfigurable Bandpass Filter Based on Split Ring Resonators and Vanadium Dioxide (VO<sub>2</sub>) Microwave Switches", Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2009), December 7-10, 2009, Singapore, art. no. 5385450, pp. 2332-2335, oral presentation,
  123. D. Bouyge, **A. Crunteanu**, J.-C. Orlanges, D. Passerieux, P. Blondy, A. Velez, J. Bonache, F. Martin, C. Champeaux, A. Catherinot, "Tuneable Bandpass Filter Based on Split Ring Resonators Using Semiconductor-to-Metal Transition of Vanadium Dioxide Thin Film", 2009 CNES-ESA International Workshop on Microwave Filters; IWMF, 16-18 November 2009, CNES, Toulouse, France
  124. S. Courrèges, J. Fan, **A. Crunteanu**, V. Madrangeas, M. Maignan, L. Rigaudeau "Study of Tuning Innovative Solution for the Realization of High Temperature Superconducting IMUX Filters", 2009 CNES-ESA International Workshop on Microwave Filters; IWMF, 16-18 November 2009, CNES, Toulouse, France
  125. J. Givernaud, **A. Crunteanu**, A. Pothier, C. Champeaux, A. Catherinot, and P. Blondy, "CPW Self-resetting Power Limiting Devices Based on Microwave Power Induced Semiconductor-Metal Transition in Vanadium Dioxide", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, IMS 2009, paper TU2E-5, Boston, MA, USA, 7-12 June 2009, oral presentation
  126. D. Mardivirin, A. Pothier, J.-C. Orlanges, **A. Crunteanu**, P. Blondy, "Charging Acceleration in Dielectric Less RF MEMS Switched Varactors under CW Microwave Power", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, IMS 2009, paper THPK-5, Boston, MA, USA, 7-12 June 2009, poster presentation
  127. J.-C. Orlanges, J. Givernaud, C. Champeaux, A. Catherinot, T. Merle-Mejean, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Blondy, "The effect of thermal annealing on the electrical and structural properties of pure and nickel-doped amorphous carbon thin films deposited by PLD", E-MRS Spring Meeting 2009, Symp. Q: "Laser and plasma processing for advanced materials", Strasbourg, France, 8-12 June 2009
  128. J. Givernaud, J.-C. Orlanges, C. Champeaux, A. Catherinot, A. Pothier, P. Blondy and **A. Crunteanu**, "Vanadium dioxide thin films showing a semiconductor-metal transition and their integration in advanced filtering devices in the RF/ microwave domain", E-MRS Spring Meeting 2009, Symposium G: Fundamentals and technology of multifunctional oxide thin films", Strasbourg, France, 8-12 June 2009
  129. M. Fabert, **A. Crunteanu**, V. Kermène, A. Desfarges-Berthelemot, D. Bouyge, P. Blondy, "8 ns Pulses from a Compact Fibre Laser Q-Switched by MOEMS", CLEO/IQEC 2009 Baltimore, Maryland, USA, May 31-June 5, 2009.
  130. P. Tristant, G. Sánchez, C. Dublanche-Tixier, **A. Crunteanu**, A. Bologna Alles, P. Blondy, A. Pothier, F. Tetard, « Réalisation de films piézoélectriques de nitrure d'aluminium par dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma », Premier Colloque Francophone sur les Matériaux, les Procédés et l'Environnement, 31 mai- 06 juin 2009- Ville de Busteni, Roumanie, actes du colloque, p. 45-48, Editeurs : Cornél Anton, Delia Arnaud-Cormos, Jean-Pierre Lecompte, Patrick Leprat, Alina Melinescu, Maria Preda, ISBN : 978-606-521-328-9
  131. Frederic Dumas-Bouchiat, C. Champeaux, Alain Catherinot, Julien Givernaud, Aurelian Crunteanu, P. Blondy, "RF Microwave Switches Based On Reversible Metal-Semiconductor Transition Properties Of VO<sub>2</sub> Thin Films: An Attractive Way To Realise Simple RF Microelectronic Devices" , in **MATERIALS AND DEVICES FOR SMART SYSTEMS III**, edited by J. Su, L.-P.



- Wang, Y. Furuya, S. Trolier-McKinstry, J. Leng (Mater. Res. Soc. Symp. Proc. **Volume 1129**, Warrendale, PA, 2009), paper 1129-V14-01
132. M. Georgescu, C. Champeaux, F. Dumas-Bouchiat, A. Catherinot, J. Givernaud, **A. Crunteanu**, "Synthesis of reversible metal-insulator VO<sub>2</sub> thin films by PLD for application to RF microwave devices", The 3rd International Workshop on Advanced Ceramics (IWAC03), November 6-8, 2008, Limoges, France. Poster
  133. J. Fan, M. Chatras, **A. Crunteanu**, A. Bassam, C. Champeaux, A. Catherinot, D. Cros, "AlN Thin Film for Bulk Acoustic Wave resonator", The 3rd International Workshop on Advanced Ceramics (IWAC03), November 6-8, 2008, Limoges, France. Présentation orale
  134. B. Lacroix, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Blondy, "Phase shifter design based on fast RF MEMS switched capacitor", European Microwave Week 2008 (EuMW) , EuMC/EuMIC04-2, Amsterdam, The Netherlands, 27-31 October 2008
  135. A. Pothier, C. Palego, P. Blondy, **A. Crunteanu**, "A dual-band MEMS reconfigurable filter for a multi-standard radio front-end", European Microwave Week 2008 (EuMW), EuMC31-1, Amsterdam, The Netherlands, 27-31 October 2008
  136. D. Mardivirin, A. Pothier, **A. Crunteanu**, M. El-Khatib, P. Blondy, O. Vendier, "Reliability of dielectric less electrostatic actuators in RF-MEMS ohmic switches", European Microwave Week 2008 (EuMW), EuMC/EuMIC04-5, Amsterdam, The Netherlands, 27-31 October 2008
  137. D. Mardivirin, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Blondy, "Charging in dielectric less electrostatic actuator RF MEMS switches", MEMSWAVE 2008, 9th International Symposium on RF MEMS and RF Microsystems, Héraklion, Crète, Grèce, 30 Juin - 3 Juillet 2008
  138. D. Bouyge, P. Blondy, **A. Crunteanu**, A. Pothier, "X band switched RF-MEMS band reject filter", MEMSWAVE 2008, 9th International Symposium on RF MEMS and RF Microsystems, Héraklion, Crète, Grèce, 30 Juin - 3 Juillet 2008
  139. B. Lacroix, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Blondy, "Low loss DMTL phase shifter based on fast miniature RF MEMS switched capacitors", MEMSWAVE 2008, 9th International Symposium on RF MEMS and RF Microsystems, Héraklion, Crète, Grèce, 30 Juin - 3 Juillet 2008
  140. F. Barriere, **A. Crunteanu**, A. Bessaudou, A. Pothier, F. Cosset, P. Blondy, "Fabrication of an on-wafer package for RF MEMS switches", MEMSWAVE 2008, 9th International Symposium on RF MEMS and RF Microsystems, Héraklion, Crète, Grèce, 30 Juin - 3 Juillet 2008
  141. M. Houssini, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Blondy, "A 2-pole digitally tunable filter using local one bit varactors", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, IMS 2008, TU3B-05, Atlanta, Georgia, USA, 15-20 June 2008.
  142. J. Givernaud, C. Champeaux, A. Catherinot, A. Pothier, P. Blondy, **A. Crunteanu**, "Tunable band stop filters based on metal insulator transition in vanadium dioxide thin films", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, IMS 2008, WEP1D-02, Atlanta, Georgia, USA, 15-20 June 2008
  143. D. Mardivirin, D. Bouyge, A. Crunteanu, A. Pothier, P. Blondy, "Study of residual charging in dielectric less capacitive MEMS switches", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, IMS 2008, TU3B-04, Atlanta, Georgia, USA, 15-20 June 2008
  144. D. Bouyge, C. Buy, V. Couderc, **A. Crunteanu**, P. Leproux, L. Lefort, P. Blondy, "Adaptative spectral selection of a super continuum source using optical MEMS for biomedical diagnosis", Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) and The International Quantum Electronics Conference (IQEC)- CLEO / QELS 2008, San Jose, California, USA, 4-9 May 2008
  145. D. Mardivirin, D. Bouyge, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Blondy, "Reliability Study of Dielectric Less Electrostatic Actuators: Application to MEMS Switches", Caneus MNT Reliability Workshop 2008, CNES, Toulouse, France, May 28-30, 2008
  146. J. Fan, M. Chatras, **A. Crunteanu**, S. Bila, D. Cros, "Baw filters synthesis by comparison of electric and acoustic impedances", European Frequency and Time Forum, EFTF 2008, Centre de Congrès Pierre Baudis, Toulouse, France, 23-25 Avril 2008



147. F. Maury, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Blondy, F. Conseil, "RF MEMS switched varactors for medium power applications", DTIP 2008 - Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS Symposium, Nice, France, 9-11 April 2008
148. P. Blondy, C. Palego, M. Houssini, A. Pothier, **A. Crunteanu**, "RF-MEMS Reconfigurable Filters on Low Loss Substrates for Flexible Front Ends", Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference, APMC 2007, Bangkok • Thailand 11-14 Dec. 2007, pp. 1- 3, DOI 10.1109/APMC.2007.4554997
149. **A. Crunteanu**, F. Dumas-Bouchiat, C. Champeaux, A. Catherinot, V. Couderc, P. Blondy, "All Solid-State Optical switches using reversible metal-insulator transition of VO<sub>2</sub> thin films", 2<sup>nd</sup> European Optical Society Topical Meeting: "OPTICAL MICROSYSTEMS "Capri (Napoli), Italy, 30 September – 3 October 2007, oral presentation
150. **A. Crunteanu**, F. Dumas-Bouchiat, C. Champeaux, A. Catherinot, A. Pothier, P. Blondy, "Microwave Switching Functions Using Reversible Metal-Insulator Transition (MIT) in VO<sub>2</sub> Thin Films", 37th European Microwave Conference (EuMC), Munich (Germany) 8-12 October 2007, paper EuMC01-4, oral presentation
151. P. Blondy, **A. Crunteanu**, A. Pothier, P. Tristant, A. Catherinot, C. Champeaux, "Effects of Atmosphere on the Reliability of RF-MEMS Capacitive Switches", 37th European Microwave Conference (EuMC), Munich (Germany) 8-12 October 2007, paper EuMCP01-23, poster presentation
152. J. D. Martinez, P. Blondy, A. Pothier, D. Bouyge, **A. Crunteanu**, M. Chatras, "Surface and Bulk Micromachined RF MEMS Capacitive Series Switch for Watt-Range Hot Switching Operation", 37th European Microwave Conference (EuMC), Munich (Germany) 8-12 October 2007, paper EuMC/EuMIC08-5, oral presentation
153. M. El Khatib, A. Pothier, **A. Crunteanu**, O. Vendier, J.L. Cazaux, P. Blondy, "An Improved Reliability Switching Network Design based on DC Contact MEMS Switches dedicated to Switching Matrix Applications", 8<sup>th</sup> International Symposium on RF MEMS and RF Microsystems, MEMSWAVE 2007 – Barcelona (Spain), 26-29 June 2007
154. J.D. Martinez, P. Blondy, A. Pothier, D. Bouyge, **A. Crunteanu**, M. Chatras, "A Novel Structure of RF MEMS Capacitive Series Switch for Avoiding Power Induced Stiction", 8<sup>th</sup> International Symposium on RF MEMS and RF Microsystems, MEMSWAVE 2007 – Barcelona (Spain), 26-29 June 2007
155. M. Houssini, A. Pothier, P. Blondy, **A. Crunteanu**, P. Tristant, "Design of a 2-Pole Digitally Tunable RF MEMS Filter Based on a Hybrid Simulation Approach", 8<sup>th</sup> International Symposium on RF MEMS and RF Microsystems, MEMSWAVE 2007 – Barcelona (Spain), 26-29 June 2007
156. P. Blondy, C. Palego, A. Pothier, **A. Crunteanu**, "MEMS reconfigurable and tunable RF filters on ceramics", IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Workshop WME: High-Q RF-MEMS Tunable Filters, 3-8 June Honolulu Hawaii, 2007
157. F. Dumas-Bouchiat, **A. Crunteanu**, C. Champeaux, P. Blondy, A. Catherinot, "Synthesis of vanadium dioxide using Pulsed Laser Deposition: an attractive Mott material to switch microwaves in radio-frequency devices", E-MRS 2007 Spring Meeting, Strasbourg (France), 28 mai- 1 juin 2007
158. P. Blondy, C. Palego, A. Pothier, **A. Crunteanu**, T. Gasseling, C. Champeaux, A. Catherinot, P. Tristant, "High power applications of RF-MEMS", Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems SiRF2007, January 10-12, 2007, Long Beach, CA, USA, Digest of Papers 166-168, 2007
159. C. Palego, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Blondy, "High power reliability aspects on RF MEMS varactor design", 17th European Symposium Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis ESREF, Wuppertal Allemagne Octobre 2006
160. **A. Crunteanu**, A. Pothier, P. Blondy, F. Dumas-Bouchiat, C. Champeaux, A. Catherinot, P. Tristant, O. Vendier, C. Drevon, J.L. Cazaux, L. Marchand, "Gamma radiation effects on RF MEMS capacitive switches", 17th European Symposium Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis ESREF, Wuppertal Allemagne Octobre 2006

161. B. Lacroix, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Blondy, "CMOS Compatible Fast Switching RF MEMS Varactors", 36nd European Microwave Conference (EuMC), Manchester, U.K., Septembre 2006
162. P. Chauveau, P. Blondy, A. Pothier, **A. Crunteanu** And S. Fargeot, "MEMS reliability assessment. Methodology for aerospace applications", Proceedings of MNT for Aerospace Applications, CANEUS 2006, Toulouse, août 2006
163. C. Palego, A. Pothier, T. Gasseling, **A. Crunteanu**, C. Cibert, C. Champeaux, P. Tristant, A. Catherinot, P. Blondy, "RF-MEMS Switched Varactor for High Power Applications", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, art. no. 4014811, pp. 35-38 (2006), San Francisco, USA, June 2006
164. P. Blondy, D. Bouyge, **A. Crunteanu**, A. Pothier, "A Wide Tuning Range MEMS Switched Patch Antennas", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, art. no. 4014844, pp. 152-154 (2006), San Francisco, USA, June 2006
165. M. El Khatib, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Blondy, "Packaging of RF MEMS switching functions on alumina substrate", 7nd Symp on Design Test Integration and Packaging of MEMS / MOEMS (DTIP) - Stresa, Lago Maggiore, Italy, avril 2006
166. D. Bouyge, D. Sabourdy, **A. Crunteanu**, P. Blondy, V. Couderc, J. Lhermite, L. Grossard, A. Barthélemy, "Integration of micro-electro-mechanical deformable mirrors in doped fiber amplifiers", 7nd Symp on Design, Test, Integration and Packaging (DTIP) of MEMS/ MOEMS, Stresa, Lago Maggiore, Italy, avril 2006
167. D. Sabourdy, D. Bouyge, **A. Crunteanu**, P. Blondy, V. Couderc, J. Lhermite, V. Kermène, A. Desfarges-Berthelemot, L. Grossard, A. Barthélemy, "Q-switched fiber laser based on deformable micro-electro-mechanical mirror", Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications SystemsTechnologies, Long Beach, California, USA, juin 2006
168. D. Sabourdy, D. Bouyge, **A. Crunteanu**, P. Blondy, V. Couderc, J. Lhermite, V. Kermène, A. Desfarges-Berthelemot, L. Grossard, A. Barthélemy, "Sum-frequency generation from a dual-wavelength-fiber Q-switched laser using deformable micro-electro-mechanical mirror", Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science, Conference and Photonic Applications SystemsTechnologies, Long Beach, California, USA, juin 2006
169. **A. Crunteanu**, F. Dumas-Bouchiat, C. Champeaux, A. Catherinot, P. Blondy, "Electrical conduction mechanisms of metal nanoclusters embedded in an amorphous  $\text{Al}_2\text{O}_3$  matrix", E-MRS 2006 Spring Meeting (E-MRS - IUMRS - ICEM 06) Nice (France), 29 mai- 2 juin 2006
170. F. Dumas-Bouchiat, S.S. Asad, C. Champeaux, A. Catherinot, **A. Crunteanu**, P. Blondy, "Optical and Electrical Properties of Metal Nanoclusters Embedded in a Dielectric Medium", *MATERIALS AND DEVICES FOR SMART SYSTEMS II*, edited by Yasubumi Furuya, Ji Su, Ichiro Takeuchi, Vijay K. Varadan, John Ulicny (Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 888, Warrendale, PA, 2006), 0888-V05-06, p. 125-130, décembre 2005
171. **A. Crunteanu**, D. Bouyge, P. Blondy, D. Sabourdy, V. Couderc, V. Kermene, A. Barthélemy, "Micro-electro-mechanical deformable mirrors for Q-switched fiber laser systems", ESA's 5th Round Table on Micro/Nano Technologies for Space, Noordwijk, The Netherlands, 3-5 novembre 2005
172. **A. Crunteanu**, P. Blondy, C. Champeaux, A. Catherinot, P. Tristant, O. Vendier, J. L. Cazaux, L. Marchand, "Dielectric charging effects in RF MEMS capacitive switches", ESA's 5th Round Table on Micro/Nano Technologies for Space, Noordwijk, The Netherlands, 3-5 November 2005
173. **A. Crunteanu**, D. Bouyge, P. Blondy, V. Couderc, L. Grossard, P.H. Pioger, A. Barthélemy, "Development of a micro-electro-mechanical deformable mirror for fiber laser emission modulation", IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMs and Their Applications, art. no. 1540063, pp. 35-36, Oulu, Finland, 1-4 August 2005
174. L. Mercier, Thévenot, M., **A. Crunteanu**, Jecko, B., Orlényes, J.C., C. Champeaux, A. Catherinot, P. Blondy, "Design and measurement of a smart tunable periodic material", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005, art. 1517025, pp. 1645-1648 (2005)

175. B. David, N. Pizúrová, O. Schneeweiss, P. Bezdička, J. Filip, R. Alexandrescu, I. Morjan, **A. Crunteanu**, I. Voicu, "Annealing behaviour of Fe-C-N nanopowder: formation of iron/graphite core-shell structured nanoparticles", Fourth International Conference on Materials Structure & Micromechanics of Fracture (MSMF-4), Brno, Czech Republic, 23-25 June 2004
176. S. Hitier, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Blondy, D. Cros, J. C. Orlanges, C. Champeaux, A. Catherinot, O. Vendier, J. L. Cazaux, "Low loss and high isolation MEMS switching networks using MEMS DC contact switches", 5th Workshop on MEMS for millimeter wave communications « MEMSWAVE », Uppsala, Suede, Juin 2004.
177. O. Vendier, P. Blondy, L. Marchand, **A. Crunteanu**, C. Drevon, J.L. Cazaux, "Reliability of RF-MEMS switches for use in space borne systems: key points toward space evaluation", CANEUS 2004, Conference on Micro-Nano Technologies for Aerospace Applications, Monterey, California, USA, October 30-November 5, 2004
178. P. Blondy, **A. Crunteanu**, C. Champeaux, A. Catherinot, P. Tristant, Vendier, O., Cazaux, J.L., Marchand, L., "Dielectric less capacitive MEMS switches", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2, pp. 573-576 (2004)
179. C. Grivas, D.P. Shepherd, T.C. May-Smith, R.W. Eason, M. Pollnau, **A. Crunteanu**, M. Jelinek "Single-transverse-mode broadband luminescence source based on a PLD grown Ti:sapphire waveguide in rib geometry", The 7th International Conference on Laser Ablation, October 5-10, 2003, Hersonissos, Crete, Greece.
180. C. Grivas, D.P. Shepherd, T.C. May-Smith, R.W. Eason, M. Pollnau, **A. Crunteanu**, and M. Jelinek, "Ti:sapphire rib waveguides as single-transverse-mode broadband fluorescence sources for optical coherence tomography applications", Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, Munich, Germany, 2003, Europhysics Conference Abstracts Vol. 27E, paper CG3-3-WED.
181. L. Laversenne, **A. Crunteanu**, P. Hoffmann, M. Pollnau, P. Moretti, and J. Mugnier, "Proton implanted sapphire planar and channel waveguides", Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, Munich, Germany, 2003, Europhysics Conference Abstracts Vol. 27E, paper CG3-2-WED
182. L. Laversenne, **A. Crunteanu**, P. Hoffmann, M. Pollnau, P. Moretti, and J. Mugnier, "Sapphire planar waveguides fabricated by H<sup>+</sup> ion beam implantation", Conference on Lasers and Electro-Optics, Baltimore, Maryland, 2003, paper CThT7.
183. **A. Crunteanu**, Jahnchen, G., Salathé, R.P., P. Hoffmann, M. Pollnau, Eason, R.W., Shepherd, D.P., "Ti:sapphire rib channel waveguide fabricated by reactive ion etching of a planar waveguide", Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO - Technical Digest, p. 265 (2002)
184. L. Laversenne, S. Rivier, **A. Crunteanu**, M. Pollnau, C. Grivas, D.P. Shepherd, and R.W. Eason, "Ti:sapphire channel-waveguide emitters as broadband light sources for interferometry", 5th French-Israeli Workshop on Optical Properties of Inorganic Materials, Lyon, France, 2002, in Optical Properties of Inorganic Materials Scientific Program and Workshop Abstracts.
185. L. Laversenne, **A. Crunteanu**, P. Hoffmann, M. Pollnau, P. Moretti, and J. Munier, "Refractive-index variations and waveguiding in sapphire induced by ion-beam implantation", 5th French-Israeli Workshop on Optical Properties of Inorganic Materials, Lyon, France, 2002, in Optical Properties of Inorganic Materials Scientific Program and Workshop Abstracts.
186. **A. Crunteanu**, G. Jänchen, P. Hoffmann, M. Pollnau, and C. Buchal, "Structuring of sapphire by ion beam implantation and chemical wet etching", Micro- and Nanoengineering International Conference, Lugano, Switzerland, 2002, Book of Abstracts, pp. 218-219, paper MSF-P10.
187. **A. Crunteanu**, M. Pollnau, G. Jänchen, P. Hoffmann, R.P. Salathé, R.W. Eason, and D.P. Shepherd, "Laser-assisted microstructuring for Ti:sapphire channel-waveguide fabrication", Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 5147, pp. 363-369 (2003),  
International Conference on Advanced Laser Technologies, Adelboden, Switzerland, 2002, Technical Digest, pp. 136-137.
188. I. Morjan, R. Alexandrescu, I. Soare, F. Dumitrache, I. Sandu, I. Voicu, **A. Crunteanu**, E. Vasile, V. Ciupina, S. Martelli, "Nanoscale powders of different iron oxide phases prepared by

continuous laser irradiation of iron pentacarbonyl-containing gas precursors", European Materials Research Society Meeting, Strasbourg, France, 2002, Scientific Program, paper Q PIII/18.

189. **A. Crunteanu**, P. Hoffmann, M. Pollnau, and Ch. Buchal, "Structuring of sapphire by laser-assisted methods, ion-beam implantation, and chemical wet etching", European Materials Research Society Meeting, Strasbourg, France, 2002, Scientific Program, p. D8, paper D-II.21.
190. **A. Crunteanu**, G. Jänchen, R.P. Salathé, P. Hoffmann, M. Pollnau, R.W. Eason, and D.P. Shepherd, "Ti:sapphire rib channel waveguide fabricated by reactive ion etching of a planar waveguide", Conference on Lasers and Electro-Optics, Long Beach, California, 2002, OSA Trends in Optics and Photonics, Vol. 73 (Optical Society of America, Washington, DC 2002), p. 265, paper CTuP5.
191. V.S. Teodorescu, C.S. Sandu, **A. Crunteanu**, M.G. Blanchin, J.A. Roger, B. Canut, "Excimer Laser Crystallisation of  $\text{SnO}_2\text{:Sb}$  Sol-Gel Films", Conference on Radiation Effects in Insulators, REI 11, Lisbon, Portugal, September 03-07, 2001.
192. R. Alexandrescu, I. Morjan, I. Voicu, **A. Crunteanu**, F. Dumitrache, I. Sandu, I. Soare, "Laser synthesis and characterization of nanopowders with different iron-oxide structures, including the  $\gamma$  phase", International Conference ALT'01, Constanta, Romania, 11-14 Sept., 2001.
193. I. Morjan, R. Alexandrescu, I. Voicu, F. Dumitrache, I. Sandu, **A. Crunteanu**, I. Soare, I. Gutu, E. Vasile, B. Rand, R. Brydson, H. Daniels, "Nanostructured carbon obtained by laser pyrolysis from gas-phase reactants", International Conference on Carbon CARBON'01, Lexington, Kentucky, SUA, 13-19 July, 2001.
194. H. Hofmeister, F. Huiskens, B. Kohn, R. Alexandrescu, S. Cojocaru, **A. Crunteanu**, I. Morjan, I. Voicu, L. Diamandescu, "Structural Analysis Of Filamentary And Nanoscaled Iron And Iron Oxide Particles Prepared By Laser Pyrolysis From The Gas Phase", European Materials Research Society Meeting, Strasbourg, France, May 30 – June 2, 2000, Symposium E Current Trends In Nanotechnologies, Scientific Program paper E-IV/P10.
195. R. Alexandrescu, **A. Crunteanu**, I. Morjan, S. Petcu, I. Voicu, L. Diamandescu, X. Armand, N. Herlin-Boime, M. Mayne, C. Reynaud, "Fullerenes iron complexes obtained by laser synthesis from gas/aerosol phases", Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 4430, pp. 196-204. (2000), ROMOPTO 2000, Bucharest, 4-7 Sept., 2000.
196. **A. Crunteanu**, R. Alexandrescu, S. Cojocaru, M. Charbonnier, M. Romand, F. Vasiliu, "Synthesis and characterization of CN thin films by IR laser deposition in a flow reactor" European Conference on Chemical Vapor Deposition EUROCVI 12, Sitges (Barcelona), Spain, 27 September 1999.
197. R. Alexandrescu, S. Cojocaru, **A. Crunteanu**, I. Morjan, I. Voicu, L. Diamandescu, F. Vasiliu, F. Huiskens, B. Kohn, H. Hofmeister "Parametric dependence of iron and iron carbide based nanoparticles laser synthesised from iron pentacarbonyl vapours and hydrocarbons", 1-st Workshop of COST 523 European Action, ENEA-Frascati (Roma, Italy, 21-23 October 1999).
198. F. Huiskens, B. Kohn, R. Alexandrescu, S. Cojocaru, **A. Crunteanu**, "Production of crystalline SiC nanoparticles and characterisation by XRD and FTIR spectroscopy", Spring Meeting of the German Physical Society, Muenster/Germany, 22-26 March 1999, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Contribution O36.75, p. 932.
199. H. Hofmeister, F. Huiskens, B. Kohn, R. Alexandrescu, S. Cojocaru, **A. Crunteanu**, "Iron and Iron Oxide Nanoparticles produced by Laser Pyrolysis of Iron Pentacarbonyl" International Symposium on Metastable Mechanically Alloyed and Nanocrystalline Materials (ISMANAM-99), August 30 - Sept. 3, 1999, Dresden/Germany, Book of Abstracts, p. P1-72. – Best Poster Award.
200. R. Alexandrescu, Cireasa, R., **A. Crunteanu**, Cojocaru, C.S., I. Morjan, Kumar, A., Vasiliu, F., "Synthesis of crystalline structures of CN<sub>x</sub> thin films deposited on sapphire, quartz and alumina substrates", Materials Research Society Symposium - Proceedings, 555, pp. 413-418 (1999)
201. D. Pantelica, F. Negoita, **A. Crunteanu**, M. Charbonnier, M. Romand, F. Vasiliu, R. Alexandrescu, "Characterization Of Carbon Nitride Thin Films Obtained By Laser Induced Chemical Vapor Deposition", IBA-14 / ECAART 6 Conference, July 26-30, 1999, Dresden, Germany.



202. S. Martelli, A. Mancini, R. Giorgi, R. Alexandrescu, S. Cojocaru, **A. Crunteanu**, I. Voicu, M. Balu, I. Morjan, "Powdery inorganic compounds of iron obtained by laser-induced reactions in the gas phase", 1-st Workshop of COST 523 European Action, ENEA-Frascati (Roma), Italy, 21-23 Oct.1999
203. **A. Crunteanu**, M. Charbonnier, M. Romand, "Crystalline carbon nitride thin films with high nitrogen content obtained by UV laser chemical vapor deposition" Third Workshop On Thin Film Physics And Technology 8 - 26 March 1999 including "Topical Conference On Microstructure And Surface Morphology Evolution In Thin Films", 24 - 26 March 1999, ICTP - The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics Trieste, Italy.
204. F.Vasiliu, R.Alexandrescu, **A. Crunteanu**, R.Cireasa, S.Cojocaru, "SEM, TEM and TED investigations of some laser deposited CN<sub>x</sub> layers", The 14 – th International Vacuum Conference IVC – 14 and IFSC – 10, Birmingham, August 31 – September 4, 1998.
205. R. Alexandrescu, **A. Crunteanu**, R. Cireasa, S. Cojocaru, I. Morjan, F. Vasiliu, " Carbon nitride thin films and nanoparticles produced from the gas phase by laser induced reactions", CIMTEC 98, Florence, Italy, June, 14-19, 1998.
206. R. Alexandrescu, **A. Crunteanu**, S.Cojocaru, I.Morjan, "An attempted approach to synthesize thin titanium boride films by LCVD from the gas phase", CIMTEC 98, Florence, Italy, June, 14-19 1998.
207. F. Vasiliu, R. Alexandrescu, R. Cireasa, **A. Crunteanu**, C.S. Cojocaru, I. Morjan, "SEM Observation of the laser melting effects induced during LCVD of hard CN<sub>x</sub> films", presented at European Research Conference. "Surface Engineering for Protection of Metals and Alloys", Granada, Spain 21-26 August 1998.
208. R. Alexandrescu, **A. Crunteanu**, R. Cireasa, S. Cojocaru, I. Morjan, A. Kumar, "Carbon Nitride Thin Films Synthesized from the Gas-Phase by Laser-Induced Reactions: a Parametric Study", TMS 1998, San Antonio, TX, USA, February 1998.
209. **A. Crunteanu**, R. Alexandrescu, R. Cireasa, S. Cojocaru, I. Morjan, A. Andrei, A. Kumar, "Deposition of carbon nitride thin films by IR-laser-induced reactions in carbon-nitrogen gas-phase compounds", Proc. SPIE Vol. 3405, p. 199-204, ROMOPTO '97: Fifth Conference on Optics; Valentin I. Vlad, Dan C. Dumitras; Eds. (1998)
210. R. Alexandrescu, R. Cireasa, C. S. Cojocaru, **A. Crunteanu**, I. Morjan, F. Vasiliu, A. Kumar, "Carbon nitride thin films and nanopowders produced by CO<sub>2</sub> laser pyrolysis", Surface Modification Technologies – SMT12 Conference, Chicago, 1-6 October 1998.

#### **F. Compte rendu de Congrès nationaux avec Comité de Lecture sur le texte complet:**

211. J. Leroy, **A. Crunteanu**, G. Humbert, D. Passerieux, J.-C. Orlanges, C. Champeaux, P. Blondy; "Caractérisation de la transition isolant/métal du dioxyde de vanadium du DC aux fréquences THz"; 18èmes Journées Nationales Microondes, 14-17 Mai 2013, Paris. Papier J3-TM1-5
212. J. Leroy, **A. Crunteanu**, G. Humbert, J.-C. Orlanges, C. Champeaux, P. Blondy; "Métamatériaux dans le domaine térahertz accordables électriquement"; 18èmes Journées Nationales Microondes, 14-17 Mai 2013, Paris. Papier J1-TM-P4
213. J. Leroy, **A. Crunteanu**, G. Humbert, D. Ferachou, J.-C. Orlanges, C. Champeaux, P. Blondy, "Metamateriaux accordables dans le domaine terahertz a base des matériaux a transition isolant/metal", 12e Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, 28-30 mars 2012, Centre de Congrès Le Manège – Chambéry, présentation orale
214. J. Leroy, **A. Crunteanu**, J. Givernaud, J.-C. Orlanges, C. Champeaux, A. Catherinot, P. Blondy, "Génération d'auto-oscillations électriques dans des dispositifs à base de films de VO<sub>2</sub> présentant une transition de phase isolant-métal », 17èmes Journées Nationales Microondes, JNM 2011, Brest, France, 17-20 mai 2011, présentation Orale Session 2B-1
215. P. Blondy, C. Guines, A. Pothier, **A. Crunteanu**, F. Barriere, S. Courreges, W. Rebernak, M.P. Dussaubay, G. Neveu, M. Gibaud, D. Courtney, B. Ducarouge, T. Gasseling, "Réalisation d'un filtre passe bande accordable à MEMS RF ultra linéaire", 17èmes Journées Nationales Microondes, JNM 2011, Brest, France, 17-20 mai 2011, présentation Orale Session 3D-2



216. Verger, A. Pothier, C. Guines, **A. Crunteanu**, P. Blondy, J.-C. Orlianges, J. Dhennin, F. Courtade, O. Vendier, « *Performances de micro-commutateurs MEMS RF miniatures et ultra rapides* », 17èmes Journées Nationales Microondes, JNM 2011, Brest, France, 17-20 mai 2011, présentation Orale Session 6B-1
217. J. Gauvin, F. Barriere, D. Mardivirin, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Blondy, O. Vendier, J.-L. Cazaux, « *Conception de MEMS RF capacitifs fiables à faible tension d'actionnement* », 17èmes Journées Nationales Microondes, JNM 2011, Brest, France, 17-20 mai 2011, présentation Orale Session 8B-5
218. J. Leroy, J. Givernaud, **A. Crunteanu**, D. Mardivirin, C. Champeaux, J.-C. Orlianges, A. Catherinot, P. Blondy, « *Analyse de la durée de vie de commutateurs électriques basés sur la transition isolant-métal du dioxyde de vanadium* », 17èmes Journées Nationales Microondes, JNM 2011, Brest, France, 17-20 mai 2011, présentation Poster Session 1E-1
219. F. Barriere, F. Cosset, A. Bessaudou, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Blondy, « *Etude et réalisation d'une capacité commutée MEMS RF encapsulée* », 17èmes Journées Nationales Microondes, JNM 2011, Brest, France, 18-20 mai 2011, présentation Orale Session 8B-1
220. F. Barriere, F. Cosset, A. Bessaudou, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Blondy, « *Réalisation d'une encapsulation faible température par film mince métallique pour les micro-commutateurs MEMS-RF* », 17èmes Journées Nationales Microondes, JNM 2011, Brest, France, 18-20 mai 2011, présentation Orale Session 8B-3
221. F. Barriere, D. Mardivirin, **A. Crunteanu**, A. Pothier, P. Blondy, « *Filtre réjecteur de bande elliptique accordable de 9 à 11,5 GHz à MEMS-RF* », 17èmes Journées Nationales Microondes, JNM 2011, Brest, France, 18-20 mai 2011, présentation Poster Session 4F-17
222. M. Mohamed, R. Costes, F. Houndonougbo, D. Passerieux, **A. Crunteanu**, V. Madrangeas, D. Cros, M. Pate, J.-P. Ganne, « *Déphaseur variable intégrant des capacités inter-digitées réalisées sur des matériaux composites ferroélectriques-diélectriques* », 17èmes Journées Nationales Microondes, JNM 2011, Brest, France, 18-20 mai 2011, présentation Poster Session 7F-9
223. Verger, A. Pothier, C. Guines, **A. Crunteanu**, P. Blondy, J.-C. Orlianges, J. Dhennin, F. Courtade, O. Vendier, « *Conception de micro-commutateurs MEMS RF miniatures à nanogap pour la reconfiguration ultra rapide* », 14<sup>ème</sup> édition des Journées Nationales du Réseau Doctoral en Micronanoélectronique (JNRDM), Cachan, France, 23-25 mai 2011, présentation poster
224. J. Leroy, **A. Crunteanu**, J. Givernaud, D. Mardivirin, J.-C. Orlianges, C. Champeaux, A. Catherinot, P. Blondy, « *Propriétés non-linéaires des dispositifs électriques à deux terminaux basées sur la transition isolant-métal du dioxyde de vanadium* », Deuxième colloque francophone PLUridisciplinaire sur les Matériaux, l'Environnement et l'Electronique (PLUMEE 2011), Limoges (France), 30 Mai -1 Juin 2011, présentation poster- 1A-59-Plumee2011
225. J. Leroy, F. Cosset, A. Bessaudou, **A. Crunteanu**, « *Réalisation et caractérisation de films minces de dioxyde de vanadium par évaporation réactive au canon à électrons* », Deuxième colloque francophone PLUridisciplinaire sur les Matériaux, l'Environnement et l'Electronique (PLUMEE 2011), Limoges (France), 30 Mai -1 Juin 2011, présentation poster - 2C-26-Plumee2011
226. M. Mohamed, R. Costes, F. Houndonougbo, D. Passerieux, **A. Crunteanu**, V. Madrangeas, D. Cros, M. Pate, J.-P. Ganne, « *Intégration de composites ferroélectriques / diélectriques dans des dispositifs microondes accordables* », Deuxième colloque francophone PLUridisciplinaire sur les Matériaux, l'Environnement et l'Electronique (PLUMEE 2011), Limoges (France), 30 Mai -1 Juin 2011, présentation poster - 2B-06-Plumee2011
227. H. Dardar, V. Couderc, J.-R. Duclere, **A. Crunteanu**, P. Thomas, « *Systèmes vitreux à base d'oxyde de tellure : application aux guides optiques actifs non-linéaires* », Le deuxième colloque francophone PLUridisciplinaire sur les Matériaux, l'Environnement et l'Electronique (PLUMEE 2011), Limoges (France), 30 Mai -1 Juin 2011, présentation orale- 4C-38-Plumee2011
228. M. Fabert, A. Desfarges-Berthelemot, V. Kermene, P. Blondy, **A. Crunteanu**, « *Verrouillage actif des modes longitudinaux d'un laser à fibre à l'aide d'un micro-miroir déformable* », Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG), Optique Marseille 2011, 4-7 Juillet 2011, présentation poster P159
229. **A. Crunteanu**, J. Leroy, J. Givernaud, J.- C. Orlianges, C. Champeaux, A. Catherinot, P. Blondy, « *Current-Induced oscillations in two-terminals electrical switches based on Metal-Insulator* »

- Transition of VO<sub>2</sub>", French Symposium on Emerging Technologies for Micro-nanofabrication, - JNTE 10 - Ecole Polytechnique, Palaiseau - November 24-26, 2010
230. F. Dautre, **A. Crunteanu**, V. Couderc et D. Pagnoux, « Génération d'impulsions picosecondes dans une cavité déclenchée grâce à un miroir électromécanique », Journées Nationales d'Optique Guidée, JNOG 2010, Besançon, 20-22 Octobre 2010
  231. M. Chatras, **A. Crunteanu**, J. Fan, C. Champeaux, A. Bassam, A. Djouadi, « Films Minces d'AlN pour les Télécommunications », MATERIAUX 2010, Nantes – du 18 au 22 octobre 2010
  232. F. A. Houndonougbo, R. Costes, J. Fan, **A. Crunteanu**, V. Madrangeas, D. Cros, M. Pate, J.P. Ganne, P. Montiel, "Capacités MIM Ferroélectriques : Intégration dans un filtre deux pôles reconfigurables en fréquence", 11èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux (JCMM), Brest, 31 Mars–2 Avril 2010
  233. M. Mohamed, R. Costes, D. Passerieux, **A. Crunteanu**, V. Madrangeas, D. Cros, M. Pate, J.-P. Ganne, "Intégration de capacités planaires accordables réalisées sur céramiques BST dopées dans des déphaseurs", 11èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux (JCMM), Brest, 31 Mars–2 Avril 2010
  234. **A. Crunteanu**, D. Bouyge, J.-C. Orlanges, C. Champeaux, A. Catherinot, A. Velez, J. Bonache, F. Martin, D. Cros, P. Blondy, "Intégration des films de VO<sub>2</sub> à transitions de phase pour la réalisation d'un filtre accordable passe-bande en technologie SSR", 11èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux (JCMM), Brest, 31 Mars–2 Avril 2010
  235. J.-C. Orlanges, **A. Crunteanu**, J. Givernaud, A. Pothier, V. Laur, P. Blondy, C. Champeaux, A. Catherinot, "Propriétés électriques des films minces de carbone amorphe dopé au nickel déposés par ablation laser : intégration dans des composants RF et microonde", présentation orale, 1B-1, JNM- 16èmes Journées Nationales Microondes, Grenoble, France 27 au 29 mai 2009
  236. Julien Givernaud, **Aurelian Crunteanu**, J.-C. Orlanges, Arnaud Pothier, C. Champeaux, Alain Catherinot et P. Blondy, "Dispositifs limiteurs de puissance RF/microonde basés sur la transition semi-conducteur-métal du dioxyde de vanadium", présentation orale, 1B-5, JNM- 16èmes Journées Nationales Microondes, Grenoble, France 27 au 29 mai 2009
  237. Benjamin Lacroix, Aurélie Verger, Arnaud Pothier, **Aurelian Crunteanu**, Jean Christophe Orlanges, P. Blondy, Apport de capacités commutées MEMS RF miniatures pour la réalisation de fonctions de déphasage à faibles pertes et forte linéarité , présentation orale, 2B-3, JNM- 16èmes Journées Nationales Microondes, Grenoble, France 27 au 29 mai 2009
  238. David Mardivirin, Arnaud Pothier, Jean Christophe Orlanges, **A. Crunteanu** et P. Blondy, "Etude du Chargement Résiduel d'Actionneurs Electrostatiques Sans Diélectrique dans les Commutateurs MEMS RF", poster, 4F-1, JNM- 16èmes Journées Nationales Microondes, Grenoble, France 27 au 29 mai 2009
  239. J. Fan, M. Chatras, B. Abdallah, A. Djouadi, **A. Crunteanu** et D. Cros, "Résonateur piézoélectrique suspendu avec électrode flottante", poster, 4F-4, JNM- 16èmes Journées Nationales Microondes, Grenoble, France 27 au 29 mai 2009
  240. M. Fabert, V. Kermène, A. Desfarges-Berthelemot, **A. Crunteanu**, D. Bouyge et P. Blondy, "Impulsions courtes délivrées par un laser à fibre déclenché par un micromiroir déformable", 27<sup>èmes</sup> Journées Nationales d'Optique Guidée, Lannion, France 20-22 Octobre 2008, Poster A1.8.
  241. M. Jaafar, C. Aupetit-Berthelemot, **A. Crunteanu** Et J.-M. Dumas, « Impact de la fiabilité des MOEMS sur les performances simulées des brasseurs optiques », JNMO08, 12ièmes Journées Nano, Micro Et Optoélectronique, 3 - 6 juin 2008 l'île d'Oléron, France, présentation poster
  242. F. Dumas-Bouchiat, C. Champeaux, A. Catherinot, **A. Crunteanu**, P. Blondy, "Commutateurs RF-Microondes basés sur la transition réversible semi-conducteur-métal de films de VO<sub>2</sub> déposés par ablation laser", 10èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, Session Posters (P4), Hôtel de Région, Limoges, France, 2- 4 Avril 2008
  243. G. Sanchez, **A. Crunteanu**, C. Dublanche-Tixier, P. Tristant, A. Bologna Alles, A. Pothier, P. Blondy, "Couches minces piézoélectriques de nitrure d'aluminium pour application dans des dispositifs à ondes acoustiques", 10èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, Session Orale 7: Technologies d'Elaboration (07-4), Hôtel de Région, Limoges, France, 2 au 4 Avril 2008

244. A. Pothier, Cristiano Palego, **A. Crunteanu**, P. Blondy, Pascal Tristant, "Application de la technologie MEMS RF pour la synthèse de filtres multistandards", XVèmes Journées Nationales Micro-ondes, Toulouse, 2 3-25 mai 2007, papier 4.E.5
245. Mohamad Houssini, P. Blondy, A. Pothier, **A. Crunteanu**, Pascal Tristant, "Conception de filtres accordables à fort coefficient de qualité par intégration de varactors MEMS RF", XVèmes Journées Nationales Micro-ondes, Toulouse, 2 3-25 mai 2007, papier 4.E.6
246. P. Blondy, C. Palego, **A. Crunteanu**, A. Pothier, T. Gasseling, C. Champeaux, P. Tristant, A. Catherinot, "Déphaseur MEMS 2 Bits en Bande Ka pour les Applications de Moyenne Puissance", XVèmes Journées Nationales Micro-ondes, Toulouse, 2 3-25 mai 2007, papier 4.E.13
247. C. Belkhiri, P. Blondy, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Tristant, C. Champeaux, A. Catherinot, C.Zanchi, C. Laporte, "Résonateurs en bande X à Q élevé accordables par des varactors micro électromécaniques", XVèmes Journées Nationales Micro-ondes, Toulouse, 2 3-25 mai 2007, papier 5.D.22
248. **A. Crunteanu**, Frédéric Dumas-Bouchiat, C. Champeaux, Alain Catherinot, A. Pothier, P. Blondy, "Réalisation de fonctions de commutation micro-ondes à base de couches minces de VO<sub>2</sub>", XVèmes Journées Nationales Micro-ondes, Toulouse, 2 3-25 mai 2007, papier 5.E.6
249. P. Chauveau, P. Blondy, A. Pothier, **A. Crunteanu**, S. Fargeot, "Application de MEMS Rf dans un environnement mécanique hostile", XVèmes Journées Nationales Micro-ondes, Toulouse, 2 3-25 mai 2007, papier 7.B.1
250. B. Lacroix, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Blondy, "Nouveau concept de capacités commutées MEMS RF ultra-rapides", XVèmes Journées Nationales Micro-ondes, Toulouse, 2 3-25 mai 2007, papier 7.B.2
251. D. Bouyge, P. Blondy, **A. Crunteanu**, A. Pothier, "Nouvelle technologie et fiabilité d'un commutateur MEMS capacitif sans diélectrique", XVèmes Journées Nationales Micro-ondes, Toulouse, 2 3-25 mai 2007, papier 7.B.4
252. F. Maury, A. Pothier, **A. Crunteanu**, François Conseil, D. Dubuc, P. Blondy, "Conception électromécanique de varactors MEMS appliquée à la commutation sous forte puissance", XVèmes Journées Nationales Micro-ondes, Toulouse, 2 3-25 mai 2007, papier 7.B.6
253. D. Bouyge, **A. Crunteanu**, V. Couderc, D. Sabourdy, P. Blondy, A. Barthélémy, "Laser déclenché à fibre incluant des éléments électromécanique à commutation rapide de type MOEMS", 25<sup>èmes</sup> Journées Nationales d'Optique Guidée, JNOG 2006, Metz, novembre 2006
254. D. Bouyge, D. Sabourdy, **A. Crunteanu**, V. Couderc, P. Blondy, A. Barthélémy, "Système laser à fibre multilongueur d'onde à déclenchement électromécanique", 25<sup>èmes</sup> Journées Nationales d'Optique Guidée, JNOG 2006, Metz, novembre 2006
255. D. Bouyge, D. Sabourdy, **A. Crunteanu**, V. Couderc, P. Blondy, "Développement de micro miroirs déformables pour la génération d'impulsions nanosecondes en régime Q-switch", 25<sup>èmes</sup> Journées Nationales d'Optique Guidée, JNOG 2006, Metz, novembre 2006
256. **A. Crunteanu**, A. Pothier, P. Blondy, P. Tristant, F. Dumas-Bouchiat, C. Champeaux, A. Catherinot, O. Vendier, C. Drevon, J.L. Cazaux et L. Marchand, "Effets des radiations gamma sur des commutateurs type MEMS RF à base de couches minces diélectriques Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>", Matériaux 2006, Dijon, 13-17 novembre 2006
257. S. Hitier, A. Pothier, **A. Crunteanu**, P. Blondy, D. Cros, J C. Orlianges, C. Champeaux, A. Catherinot, O. Vendier, J. L. Cazaux, "Réseaux de commutation MEMS large bande, réalisés sur substrats céramiques", Journées Nationales des Microondes, Nantes, mai 2005
258. **A. Crunteanu**, A. Pothier, P. Blondy, C. Champeaux, A. Catherinot, P. Tristant, O. Vendier, J. L. Cazaux, L. Marchand, "Etude de différents diélectriques pour les micro-commutateurs MEMS capacitifs", Journées Nationales des Microondes, Nantes, mai 2005
259. M. Pollnau, **A. Crunteanu**, L. Laversenne, S. Rivier, C. Grivas, D.P. Shepherd, and R.W. Eason, "Ti:sapphire channel-waveguide broadband light sources for optical coherence tomography",

- Conference of the German Physical Society, Hannover, Germany, 2003, in Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2003, Quantenoptik, paper Q 39.1, Group Report.
260. L. Laversenne, **A. Crunteanu**, P. Hoffmann, M. Pollnau, P. Moretti, and J. Mugnier, "Sapphire optical waveguides fabricated by ion-beam implantation", Conference of the Swiss Physical Society, Basel, Switzerland, 2003, in Bulletin SPG/SSP, Vol. 20, 2003, paper 222, p. 55.
261. **A. Crunteanu**, L. Laversenne, P. Hoffmann, M. Pollnau, and Ch. Buchal, "Three-dimensional structuring of sapphire", Conference of the Swiss Physical Society, Basel, Switzerland, 2003, in Bulletin SPG/SSP, Vol. 20, 2003, paper 221, p. 54.
262. **A. Crunteanu**, P. Hoffmann, M. Pollnau, and Ch. Buchal, "Structuring of sapphire by ion-beam implantation and chemical wet etching", Conference of the Swiss Physical Society, Lausanne, Switzerland, 2002, in Bulletin SPG/SSP, Vol. 19, 2002, paper 224, p. 59.
263. **A. Crunteanu**, C. Hibert, G. Jänchen, R.P. Salathé, P. Hoffmann, and M. Pollnau, "Ti:sapphire channel waveguides fabricated by reactive ion etching or polyimide stripe coating", Conference of the Swiss Physical Society, Lausanne, Switzerland, 2002, in Bulletin SPG/SSP, Vol. 19, 2002, paper 213, p. 57.

### G. Publications et participations diverses:

- **A. Crunteanu**, J. Leroy, G. Humbert, J.-C. Orlianges, C. Champeaux, « Métamatériaux dans le domaine THz basées sur la réponse non-linéaire des matériaux à transition de phase », Journée Envol Recherche de la Fondation d'entreprise EADS - Jeudi 14 février 2013.
- **A. Crunteanu**, "Advanced microwave and optical switching devices based on reversible Metal-Insulator Transition (MIT) in VO<sub>2</sub> thin films", Grand colloque STIC ANR, Centre des Congrès de Lyon, 4-6 janvier 2012, présentation orale
- **A. Crunteanu**, A. Bessaoudou, F. Cosset, P. Blondy, V. Madrangeas, J.-C. Orlianges, C. Champeaux, "Advanced micro- and nano-devices based on metal-insulator phase transition materials", **6th Japanese-French Frontiers of Science Symposium (JFFoS), 19-23 January 2012, Nice, general participant and poster presentation**
- H. Dardar, V. Couderc, J.-R. Duclere, **A. Crunteanu**, P. Thomas, *Systèmes vitreux à base d'oxyde de tellure : application aux guides optiques actifs non-linéaires*, GDR Verres, Rennes, 8-9 décembre 2011, présentation poster
- E. Lemoine, A. Crunteanu, P. Blondy, « Demonstration of the Influence of the Operating Parameters of the Operation of Ohmic Contact Micro Switches » Journées Nationales du GDR Micro Nano Systèmes – Micro Nano Fluidique, 2-3 juillet 2012, Bordeaux, France, présentation poster
- **A. Crunteanu**, J.-C. Orlianges, C. Champeaux, P. Blondy, « *Advanced microwave and optical switching devices based on reversible metal-insulator transition (MIT) in VO<sub>2</sub> thin films* », Colloque ANR JCJC des 23 et 24 mars 2011, Strasbourg, France, Présentation poster
- J. Leroy, **A. Crunteanu**, « *Metal insulator transition in vanadium dioxide films : properties and applications* », GDR NAMIS International Autumn School 2011, EPFL-IMT, CNRS/REMTO-ST, 12-16 September 2011, Neuchâtel, Suisse and Besançon, France, présentation poster

### H. Vulgarisation scientifique:

- Vulgarisation site web : "Réalisation de sources lasers impulsionsnelles à base de micro-miroirs déformables type MEMS (Micro- Electro- Mechanical- System)" Fait marquant Institut INSIS-CNRS, 2010, <http://www.cnrs.fr/insis/recherche/faits-marquants/2010/sources-lasers.htm> et "2009, Une année avec le CNRS" rapport scientifique du CNRS, 2010, "Des composants optiques ultra-performants " p. 22
- **Eurocomp no.9**, printemps 2006, (the Newsletter of the Space Components steering Board of the European Space Agency (ESA)) "An Innovative RF MEMS Switch for Space Applications".
- Une partie des recherches sur les systèmes lasers innovants à base de MOEMS a été présentée dans le numéro 30 (août 2007) de la revue **Photoniques** (France) sur le titre "Système laser à fibre multi- longueur d'onde déclenché par MOEMS".